

TECHNOLOGIES DE CAPTURE ET SÉQUESTRATION DE CARBONE ET POTENTIEL DE
RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES : ANALYSE COMPARATIVE DES APPROCHES LES PLUS
PROMETTEUSES

Par
Vickie Barabé

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Décembre 2019

SOMMAIRE

Mots-clés : Changements climatiques, capture et séquestration du carbone, utilisation et valorisation du carbone, développement de technologies de capture du carbone, réduction et retrait du CO₂ atmosphérique.

L'augmentation des activités anthropiques cause une hausse des émissions de gaz à effet de serre et des concentrations de carbone dans l'atmosphère. Afin de remédier à cette situation, des technologies de capture avec séquestration ou utilisation du carbone ont été mises en place. Cette panoplie de technologies possède différentes variétés de capture avec séquestration ou utilisation du carbone, dont l'objectif principal reste de réduire les émissions de CO₂. L'objectif de cet essai consiste en l'évaluation et la comparaison de la viabilité à long terme et à grande échelle de projets de capture et séquestration ou de capture et valorisation du carbone (voir « utilisation » dans le présent essai, dans la liste des acronymes, des symboles et des sigles). L'analyse se base sur leurs effets quant à leurs applications sur les objectifs de développement déterminés par l'auteure. Le premier chapitre présente certaines réglementations internationales, dont l'accord de Paris, ainsi que les stratégies de décarbonisation. Le chapitre deux met l'accent sur le fonctionnement de la séquestration du carbone ainsi que certaines utilisations en activité ou encore à l'étude. Afin de réaliser la comparaison entre différentes technologies de capture du carbone et séquestration ou utilisation, le chapitre trois présente une revue de littérature de cinq projets internationaux, soit de capture et séquestration ou de capture et utilisation du carbone.

Pour réaliser l'objectif général de l'essai, une analyse multicritère permettant de comparer les cinq technologies est présentée au chapitre quatre. La première étape de cette analyse a permis de faire une reconnaissance des technologies de capture du carbone avec séquestration ou utilisation actuellement en exploitation ou en phase pilote. Cela a mené à la sélection de cinq projets allant être évaluées : la séquestration sous-marine, la carbonatation minérale, la capture directe de l'air, la capture enzymatique et la capture postcombustion. L'étape deux a exposé le choix de la méthode d'analyse qui est une analyse multicritère basée sur trois volets : technique, économique et environnemental. La comparaison de ces cinq projets, selon les trois volets, a mené à la sélection des critères d'analyse, basé sur les caractéristiques principales et leur importance en matière de réduction de gaz à effet de serre et du niveau d'avancement.

Les résultats ont démontré que les technologies de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix et de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering présentent le plus d'effets favorables quant à l'atteinte des objectifs de développement à long terme concernant les trois volets à l'étude. Ces technologies sont suivies par la capture et séquestration sous-marine, la capture par enzyme et la capture postcombustion. Le chapitre 5 présente des recommandations pour chaque type de technologie concernant l'atténuation des gaz à effet de serre et un futur déploiement à long terme tout en respectant les objectifs de développement des trois volets d'analyse (technique, économique et social).

En conclusion, les technologies de capture et séquestration ou de capture et utilisation ont toutes de bons avantages en matière d'atténuation des gaz à effet de serre. Avec la présente analyse, ce sont les technologies de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix et de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering qui sont les technologies étant les plus aptes à se développer à long terme tout en respectant le volet technique, économique et environnemental. Cependant, tous les efforts permettant d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre doivent être considérés comme une mesure complémentaire aux efforts d'atténuation.

SUMMARY

Key words : climate change, carbon capture and storage, carbon capture and use, development of carbon capture technologies, reduction and removal of atmospheric CO₂.

The expansion of anthropogenic activities causes an increase in greenhouse gas emissions and carbon concentrations in the atmosphere. With the use of fossil fuels, an abundant source of energy at low cost, many companies around the world use these resources to carry out their activities, resulting in an increase of CO₂ emissions.

In order to remedy this situation, carbon capture and storage technologies or carbon capture and use technologies have been put in place. This array of technologies has different varieties of capture with storage or carbon use, but the main goal is still the reduction of CO₂ emissions by either capturing directly at source or through the air. The objective of this thesis is to evaluate and compare the long-term and large-scale feasibility of capture and sequestration or carbon utilization technologies based on their effects on the application of the development objectives listed by the author. The first chapter presents some international regulations, including the Paris Agreement, as well as decarbonization strategies. Chapter two focuses on the functioning of carbon sequestration and some uses in progress or under studies. In order to compare different carbon capture technologies, chapter three presents a literature review of five international technologies either in carbon capture and storage or carbon capture and use.

To achieve the overall goal of this thesis, a multi-criteria analysis comparing the five technologies is presented in chapter four. The first step of this analysis made it possible to recognize carbon capture technologies with storage or use that are currently in operation or pilot project. This led to the selection of five technologies to be evaluated : underwater storage, mineral carbonation, direct air capture, enzyme capture and post-combustion capture. Step two consisted of the choice of the analysis method, which was a multi-criteria analysis based on three components that could impact the technologies' development: the technical, economic and environmental aspects. The comparison of these five technologies across the three components led to the selection of criteria. They were based on the main characteristics and their importance in terms of greenhouse gas reduction and level of progress.

The results demonstrated that the underwater storage technology in a saline aquifer has the most favourable effects in achieving long-term and large-scale development goals in the technical, economic and environmental areas. This technology is followed by direct air capture, mineral carbonation, enzyme capture and post-combustion capture. Chapter five shows recommendations for each type of technology regarding greenhouse gas mitigation and future large-scale deployment while meeting the development objectives of the three components. In conclusion, capture and storage or capture and use technologies all have good benefits in terms of greenhouse gas mitigation. With the present analysis, the underwater storage of the Sleipner CO₂ Storage project is the technology that is the most likely to develop on a large scale and over the long term while respecting the technical, economic and environmental aspects. However, all efforts to mitigate greenhouse gas emissions must be seen as complementary to mitigation efforts and not a replacement.

REMERCIEMENTS

Il me sera très difficile de remercier tout le monde, car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cet essai à son terme.

Je tiens d'abord à remercier Monsieur François Lafortune, enseignant au CUFÉ de l'Université de Sherbrooke, qui m'a encadré tout au long de cet essai et qui m'a fait partager ses brillantes suggestions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués. Je tiens aussi à le remercier pour sa patience et son temps durant ces huit derniers mois.

Je tiens également à remercier Geneviève Desroches pour toutes nos discussions préparatoires et ses conseils qui m'ont permis, dès le départ, de guider mon essai dans cette direction. Merci aussi à madame Judith Vien pour ses réponses aux questions administratives et de suivi tout au long de la rédaction.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de maîtrise.

Mes derniers remerciements vont à ma mère, Sylvie, qui a tout fait pour m'aider, qui m'a soutenue et surtout qui me supporte dans tout ce que j'entreprends.

En espérant, par cet essai, vous faire prendre conscience des changements que l'Homme doit apporter à son comportement envers la planète.

Agissons pour la Terre.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE	3
1.1 L'accord de Paris	4
1.2 Réglementations internationales sur le plan de réduction de GES	5
1.3 Stratégies de décarbonisation	6
2 LA SÉQUESTRATION OU LA VALORISATION DU CARBONE	8
2.1 La chaîne de capture et séquestration du carbone	8
2.1.1 Production et capture dans la chaîne CSC	8
2.1.2 Transport dans la chaîne CSC	9
2.1.3 Séquestration dans la chaîne CSC	10
2.1.4 La séquestration du carbone	10
2.1.5 La séquestration biologique	11
2.1.6 Séquestration géologique	12
2.1.7 Séquestration profonde dans l'océan	14
2.2 L'utilisation du carbone	15
2.2.1 La récupération assistée du pétrole	15
2.2.2 Le biocarburant et autre dérivé provenant des algues	16
2.2.3 La carbonatation minérale dans la roche	17
3 PROJETS DE CAPTURE ET SÉQUESTRATION OU UTILISATION DU CARBONE	18
3.1 Sleipner CO ₂ Storage, Norvège	20
3.2 CarbFix, Islande	24
3.3 Carbon Engineering, Colombie-Britannique, Canada	27
3.4 CO ₂ Solutions, Québec, Canada	30
3.5 Petra Nova, Texas, États-Unis	33
4 ANALYSE COMPARATIVE DE CINQ TECHNOLOGIES DE CSC ET CUC	35
4.1 Méthodologie de recherche	35
4.2 Étapes de l'analyse	36
4.3 Présentation et justification des critères sélectionnés	47

4.3.1	Les critères du volet technique	47
4.3.2	Les critères du volet économique	49
4.3.3	Les critères du volet environnemental	50
4.4	Contraintes et limites de l'analyse	52
4.5	Présentation des résultats globaux	52
4.6	Présentation des résultats du volet technique.....	54
4.6.1	L'année de début d'opération	54
4.6.2	Le type de projet	55
4.6.3	Le taux de capture par année	56
4.6.4	L'usage	57
4.6.5	Le rendement.....	57
4.6.6	Le niveau d'avancement.....	58
4.7	Présentation des résultats du volet économique.....	59
4.7.1	Les coûts d'exploitation	59
4.7.2	Les mesures incitatives économiques	60
4.7.3	La viabilité et faisabilité du projet à long terme.....	61
4.8	Présentation des résultats du volet environnemental	62
4.8.1	Le risque de fuites de CO ₂	63
4.8.2	L'empreinte environnementale	64
4.8.3	L'atténuation des émissions de CO ₂	65
4.8.4	La permanence du CO ₂ séquestré	66
4.9	Discussion	67
5	RECOMMANDATIONS	69
5.1	Séparation industrielle et séquestration sous-marine inspirée du projet Sleipner CO ₂ Storage..	69
5.2	Capture et séquestration par carbonatation minérale inspirée du projet CarbFix.....	71
5.3	Capture directe de l'air et réutilisation diverse inspirée du projet DAC de Carbon Engineering..	72
5.4	Capture postcombustion par enzyme et réutilisation du CO ₂ inspirée du projet de CO ₂ Solutions	73
5.5	Capture postcombustion et l'utilisation de la RAP inspirée du projet Petra Nova.....	74

5.6	Recommandations de l'essai.....	75
CONCLUSION.....		76
RÉFÉRENCES		78

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Le rôle des technologies de capture du carbone dans le scénario provisoire afin de maintenir l'augmentation de la température globale sous 2 °C.....	3
Figure 1.2	Principales stratégies pour des technologies à émissions négatives	5
Figure 1.3	Estimation des émissions de GES selon divers scénarios	6
Figure 2.1	Les processus de la chaîne de capture et séquestration du carbone	8
Figure 2.2	Méthodes de transport du dioxyde de carbone capturé à des fins de séquestration	9
Figure 2.3	Quelques réservoirs de séquestration du CO ₂	12
Figure 2.4	Représentation de quelques options de séquestration géologique.....	12
Figure 2.5	Réactions chimiques de la séquestration du carbone dans l'océan.	14
Figure 2.6	Options possibles de CSC et CUC.....	15
Figure 2.7	Utilisations du CO ₂ pour la récupération du pétrole	16
Figure 3.1	Capacités de capture du carbone annuelle et injections cumulatives annuelles de CO ₂ pour les installations de CSC et CCU de RAP	19
Figure 3.2	Schéma des installations du projet Sleipner CO ₂ Storage	21
Figure 3.3	Risques de fuite de CO ₂ lors d'une séquestration sous-marine.....	22
Figure 3.4	Échelle temporelle de l'évolution du projet CarbFix	24
Figure 3.5	Schéma des six sections du projet CarbFix2	26
Figure 3.6	Système opérationnel de capture du CO ₂ du DAC de Carbon Engineering	28
Figure 3.7	Schéma de la technologie AIR TO FUEL™	29
Figure 3.8	Schéma des installations du projet Petra Nova	33

Tableau 4.1	Résumé des cinq projets de CSC et CUC ainsi que les codes pour l'analyse	36
Tableau 4.2	Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude.....	39
Tableau 4.3	Pondérations associées aux critères pour l'analyse multicritère	47
Tableau 4.4	Synthèse de la description des critères d'analyse	51
Tableau 4.5	Résultats de l'analyse multicritère.....	53
Tableau 4.6	Résultats du volet technique	54
Tableau 4.7	Résultats du volet économique.	59
Tableau 4.8	Résultats du volet environnemental.	63

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

\$ CA	Dollars canadiens
\$ US	Dollars américains
°C	Degré Celsius
AC	Anhydrase carbonique
BECCS	Bioénergie avec la capture et séquestration du carbone
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CO ₂	Dioxyde de carbone. Dans le cadre de cet essai, le terme « carbone » correspond au CO ₂
COP	<i>Conference Of the Parties</i>
CSC	Capture et séquestration du carbone
CSUC	Capture et séquestration ou utilisation du carbone
CUC	Capture et utilisation du carbone. Les termes « utilisation » et « valorisation » sont considérés équivalents dans le présent essai.
DAC	<i>Direct Air Capture</i>
GECO	<i>Geothermal Emission Control</i>
GES	Gaz à effet de serre
Gt _{eq} CO ₂	Gigatonne d'équivalent en CO ₂
Gt _{eq} CO ₂ /an	Gigatonne d'équivalent en CO ₂ par an
HFC	Hydrofluorocarbures
IEA	<i>International Energy Agency</i>
m ³	Mètres cubes
MPa	Mégapascal
Mt	Mégatonne
Mt _{eq} CO ₂	Mégatonne d'équivalent en CO ₂
RAP	Récupération assistée du pétrole
SACS	<i>Saline Aquifer Carbon dioxide Storage</i>
SPEDE	Système de plafonnement et d'échange de droit d'émission
UNEP	<i>United Nations Environmental Programme</i>
VAQ	Valorisation Carbone Québec

INTRODUCTION

Depuis le début de l'ère de l'industrialisation, l'espèce humaine émet de plus en plus de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par la surutilisation des combustibles fossiles, mais aussi par l'intensification d'activités humaines telles que l'agriculture, la déforestation et les procédés industriels. En 2017, les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO_2) ont atteint 50,9 gigatonnes d'équivalent en CO_2 ($\text{Gt}_{\text{eq}}\text{CO}_2$) (Olivier et Peters, 2018). L'intensification des activités anthropiques a causé une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère dont les principales sources sont la production d'énergie et le transport (FAO, 2017). Avec l'utilisation des combustibles fossiles, source d'énergie abondante à faible coût, plusieurs entreprises à l'échelle mondiale utilisent ces ressources pour réaliser leurs activités, occasionnant une amplification des émissions de CO_2 . Constatant les changements climatiques qu'entraîne l'augmentation de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, de nombreux dirigeants de pays se sont réunis lors de sommets internationaux afin d'établir des accords de réduction d'émissions de GES. En 2015, lors de la Conférence de Paris sur les changements climatiques, un accord a été signé afin de limiter la hausse des températures à 2 °C ou à l'objectif de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle (Nations Unies, 2015). Afin de réduire les émissions de GES causées par les activités humaines et la combustion d'énergie fossile, des classes de technologies émergentes font leur apparition. Les énergies vertes telles que le solaire et l'éolien sont de plus en plus populaires pour remplacer l'utilisation de l'énergie fossile et réduire les émissions de carbone dans l'atmosphère. D'autres classes de technologies telles que la capture et séquestration du carbone (CSC) font aussi leur apparition comme moyen de réduire les quantités de CO_2 , dont celles déjà présentes dans l'atmosphère. Dans le cadre de cet essai, le CSC et CUC font référence au CO_2 même si l'emploi du mot « carbone » est utilisé.

L'objectif général de cet essai est d'évaluer des technologies de capture et séquestration et de capture et utilisation du carbone parmi celles qui présentent le plus d'effets favorisant les objectifs de développement énumérés au chapitre quatre. Treize objectifs de développement ont été émis par l'auteure concernant les trois volets (technique, économique et environnement) mis de l'avant lors de l'analyse. L'essai a pour objectifs secondaires de présenter : (1) Les objectifs de l'accord de Paris de 2015. (2) L'approche de séquestration et d'utilisation du carbone. (3) Une description et une analyse comparative de cinq projets de CSC et CUC selon les critères mentionnés au chapitre quatre. (4) Des recommandations concernant les cinq projets proposées selon les critères déterminés.

L'analyse réalisée dans le cadre de cet essai inclura une analyse multicritère comparant les différentes technologies de capture de carbone en fonction de leurs caractéristiques individuelles sous trois volets d'analyse. En comparant les différents concepts, il sera possible d'émettre des conclusions à savoir quelles seraient les technologies répondant le plus aux objectifs de développement à long terme et à grande échelle déterminés par l'auteure au chapitre quatre. Pour y parvenir, le chapitre quatre présentera la méthodologie de recherche ainsi que les étapes de l'analyse incluant une définition de la portée et des limites de l'analyse. Toujours dans ce même chapitre, les critères seront sélectionnés et justifiés. Ensuite, chaque critère sera

pondéré pour chaque technologie afin de déterminer lequel répondra à la question de recherche : quelle(s) technologie(s) de capture présentée(s) répond le plus positivement à l'application des objectifs de développement favorisant le développement à long terme de ces technologies.

La démarche d'analyse d'information pour parvenir aux conclusions désirées a été basée sur la vérification de la pertinence du contenu des diverses sources d'informations. Afin de valoriser la diversification des sources, plusieurs types de documents ont été consultés tels que des rapports internationaux, des politiques publiques, des données statistiques et quantitatives, des données qualitatives provenant de rapports de recherche sur la méthode de CSC/CUC et des documents explicatifs de technologies internationales de CSC/CUC.

Afin de répondre à l'objectif général, aux objectifs secondaires et à la question de recherche, une mise en contexte de la stratégie de capture et de séquestration du carbone sera décrite et principalement documentée par le rapport du programme environnemental des Nations unies (UNEP) de 2017 (*A United Nation Environment Synthesis Report*). La mise en contexte abordera aussi les objectifs de l'accord de Paris ainsi que les réglementations internationales en matière de réduction de GES. Par la suite, les différents procédés de capture du carbone seront exposés brièvement; procédé de capture postcombustion, précombustion et oxycombustion. Ensuite, les deux approches de capture de carbone seront présentées : l'approche de séquestration et l'approche de valorisation ou utilisation. Puis, différents projets et technologies seront présentés en fonction de leur contexte réglementaire et politique en plus d'être étudiés selon des variables prédéfinies. Finalement, la proposition d'approches technologiques répondant au plus de critères lors de l'analyse sera adressée à des lecteurs ciblés tels que des dirigeants de compagnies et de gouvernements souhaitant réduire leurs émissions de carbone pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris.

1 MISE EN CONTEXTE

Avec l'intensification des problématiques environnementales causées par les changements climatiques, les dirigeants mondiaux constatent, en majorité, que des actions et stratégies doivent être mises en place afin de réduire les émissions de GES. Considérant les études actuelles sur le sujet des changements climatiques, de nombreux scénarios, tels que ceux des Nations unies, ont été créés afin de visualiser l'ampleur des conséquences pouvant survenir si aucune action n'est prise (*business as usual*). Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) et son scénario limitant l'augmentation des températures à 2 °C, les technologies de capture et séquestration du carbone devront représenter 14 % des réductions d'émission pour la période allant jusqu'à 2060 (International Energy Agency, s.d.). Dans la figure 1.1, il est possible de voir que le rôle des technologies de capture de carbone peut avoir un impact négatif net sur les émissions de GES. En effet, il est possible d'en comprendre que, dès son déploiement, les technologies d'émission négative nette (en bleu) permettent de réduire les quantités d'émission de CO₂. Selon ce scénario et l'objectif de restreindre l'augmentation de la température globale sous le seuil du 2 °C (trait rouge), il est possible de voir que le niveau global de zéro émission nette se situe à 0 vers la fin du siècle. D'un premier côté, contrairement au scénario présenté à la figure 1.1, ces technologies ont été déployées beaucoup plus tôt, ce qui pourrait devancer le point de zéro émission. D'un autre côté, selon le scénario proposé, les technologies émettrices sont toujours actives vers la fin du siècle, car la prédiction de certains résidus de GES est trop difficile à prévoir et reste encore mitigée. De plus, le point de zéro émission pourrait ne pas être devancé, et ce, compte tenu du degré d'adoption ou d'acceptation de ces technologies par les grands émetteurs.

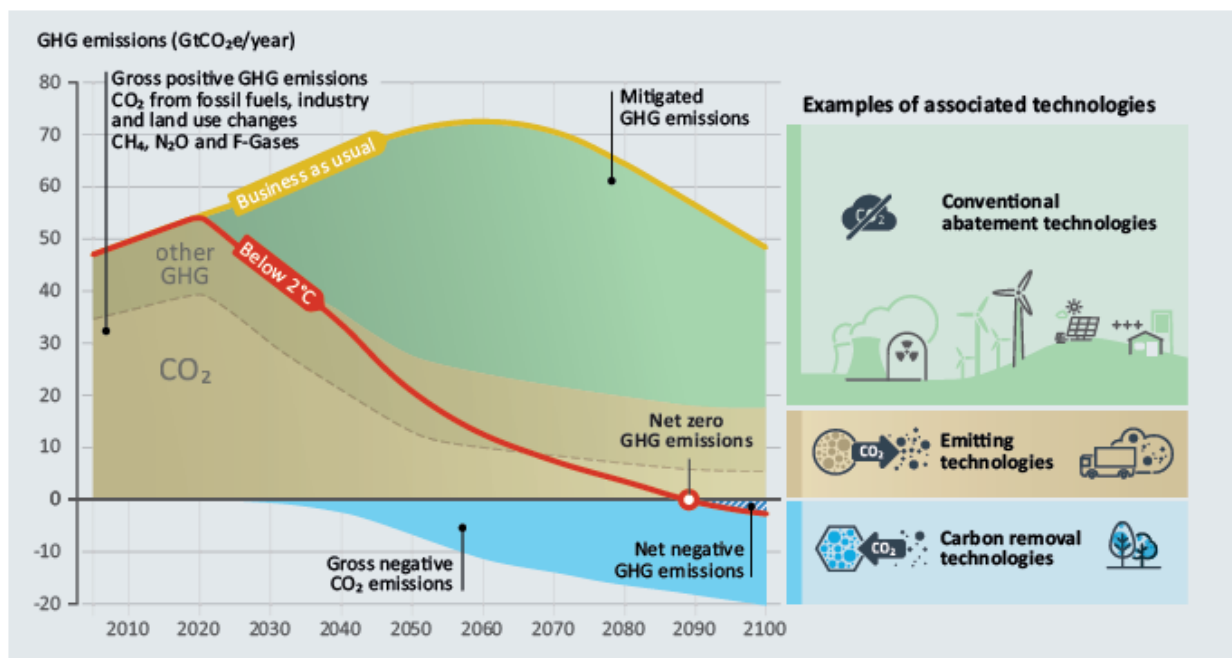


Figure 1.1 Le rôle des technologies de capture du carbone dans le scénario provisoire afin de maintenir l'augmentation de la température globale sous 2 °C (UNEP, 2017)

1.1 L'accord de Paris

En 2015, les pays membres de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) se sont rencontrés en France pour la Conférence de Paris sur les changements climatiques. Lors de cette rencontre, les dirigeants des pays ont créé un accord dont le but à long terme vise à maintenir l'amplification des températures globales sous les 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle et poursuivre les efforts menés pour limiter l'augmentation de température à 1,5 °C par rapport aux niveaux de l'ère préindustrielle. (Nations unies, 2015) Afin de respecter les objectifs de cet accord, des réductions d'émissions de GES dans divers secteurs dont le transport et les industries sont prévus, mais aussi l'introduction de nouvelles technologies pour réduire les quantités de CO₂ de l'atmosphère. Comme le mentionne l'Agence Internationale de l'Énergie :

« Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a souligné que, pour concrétiser les ambitions de l'accord de Paris visant à limiter les augmentations de température à 1,5 °C, il faudra plus qu'une simple accélération des efforts de réduction des émissions; cela peut également nécessiter le déploiement de technologies pour éliminer réellement le carbone de l'atmosphère ». (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, s.d..)

En effet, afin de réduire les quantités de carbone de l'atmosphère, plusieurs technologies ont été inventées et mises en action. Présentées à la figure 1.2, certaines d'entre elles sont d'origine naturelle et concentrée principalement dans les domaines de la foresterie et de l'agriculture comme la reforestation ou le biocarburant. D'autres, dirigés vers les domaines de l'énergie et de l'industrie, sont plus technologiques et c'est dans cette catégorie que se retrouve la capture du carbone directement de l'atmosphère. Contrairement aux stratégies dites plus « naturelles », celles étant créées par l'homme sont plus coûteuses, mais semblent être plus efficaces (UNEP, 2017).

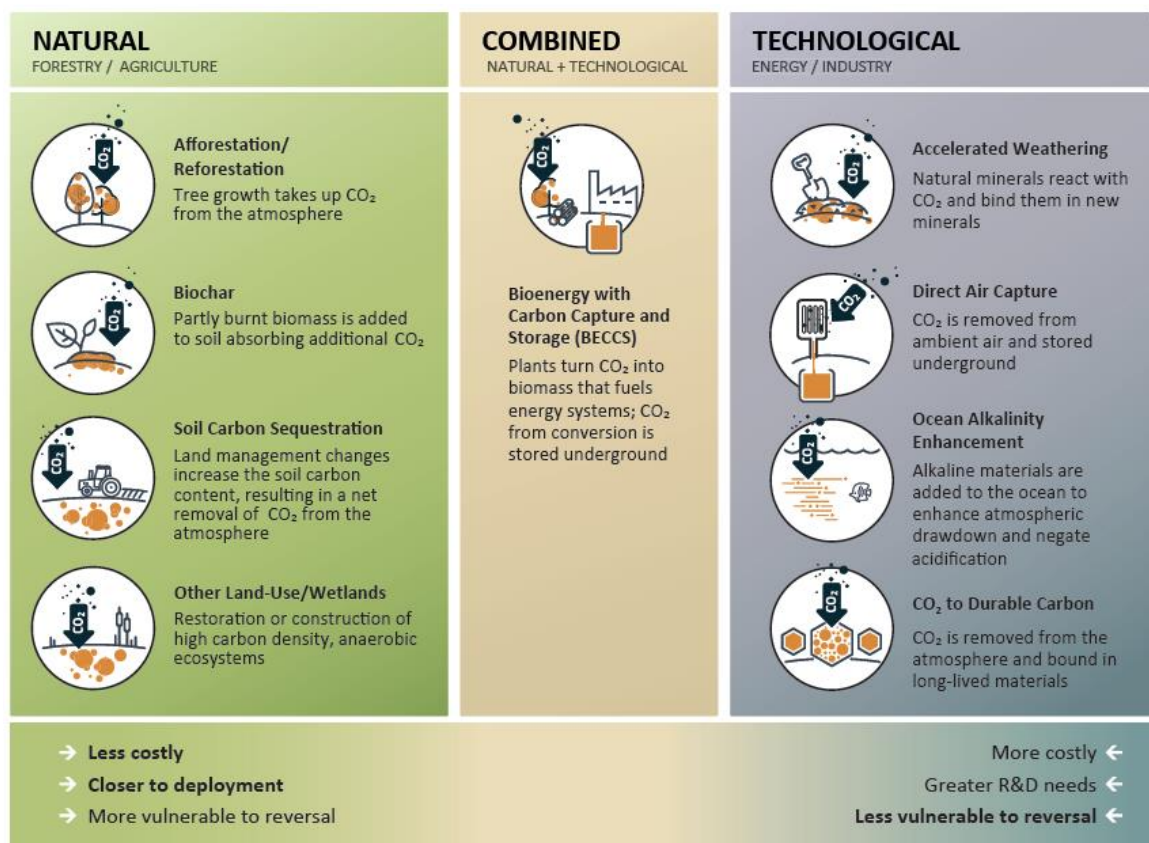


Figure 1.2 Principales stratégies pour des technologies à émissions négatives (UNEP Gap Report, 2017)

1.2 Réglementations internationales sur le plan de réduction de GES

Avant que la Conférence de Paris sur les changements climatiques de 2015 ait lieu, d'autres réglementations internationales en matière de réduction d'émissions ont été autorisées et mises en place à la suite d'accords signés par différentes nations. Le terme de réduction d'émission de GES a été abordé lors de la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement ou « Sommet de la Terre » en 1992 à Rio de Janeiro où 178 pays se sont réunis. Ce sommet a permis l'élaboration d'un plan d'action Action 21 qui énumère des recommandations et des politiques en matière d'environnement et de développement pour les prochaines décennies. En plus de ce document, ce sommet a permis la création de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) pour s'occuper plus particulièrement de la problématique des changements climatiques. À la suite du sommet de Rio, d'autres conférences des parties ou nations (COP) ont suivi au fil des années. C'est lors de la COP-3 que le protocole de Kyoto a été signé afin de réduire l'utilisation des énergies fossiles. Alors que certaines COP ont mené à des ententes et réglementations internationales, d'autres n'ont mené à aucun accord ou aucun résultat.

1.3 Stratégies de décarbonisation

Les politiques actuellement en place concernant la réduction d'émissions de carbone de niveau mondial ne permettent pas d'atteindre les niveaux d'émissions projetés pour 2020. Cela pose une contrainte puisqu'en n'atteignant pas les niveaux prévus de 2020, cela complique nécessairement la capacité d'atteindre les niveaux d'émission de 2030 prévus par l'objectif de température à long terme de l'accord de Paris. En renforçant les actions menant aux réductions des niveaux d'émissions de 2020, il serait plus facile de mettre en place et de renforcer les contributions des pays signataires de l'accord de Paris et de faciliter une transition plus stricte des émissions de dioxyde de carbone sur un plus long terme. (UNEP, 2017) La figure 1.3 présente différents scénarios ainsi que les estimations des émissions en gigatonne d'équivalent en CO₂ par an (GtCO₂/an). La première colonne expose les six scénarios étudiés. Puis, les deux colonnes suivantes présentent les émissions totales mondiales de 2025 et 2030. Enfin, la dernière colonne indique le nombre de fois que ce scénario a été étudié.

Emissions estimates (GtCO ₂ e/year) (rounded to the nearest gigatonne)			
Scenario	Global total emissions in 2025	Global total emissions in 2030	Number of scenarios in set
No-policy baseline	61.0 (56.7–64.3)	64.7 (59.5–69.5)	179
Current policy trajectory	55.4 (53.5–56.8)	58.9 (57.6–60.7)	4
Unconditional NDCs	53.8 (50.6–55.3)	55.2 (51.9–56.2)	10
Conditional NDCsa	52.2 (49.3–54.0)	52.8 (49.5–54.2)	10 (6+4)
2°C pathways (more than 66% chance 2°C, least-cost from 2020) ^b	47.7 (46.2–50.2)	41.8 (30.6–43.5)	10
1.5°C pathways (50- 66% chance 1.5°C, least-cost from 2020) ^c	44.5 (43.1–45.5) ^d	36.5 (32–37.7) ^{d,e}	6

Figure 1.3 Estimation des émissions de GES selon divers scénarios (UNEP Gap Report, 2017)

Le premier scénario présenté est le typique « *business as usual* » dans lequel aucun changement significatif n'a lieu au niveau de l'attitude et des priorités de la population et aucune contribution additionnelle n'est faite en termes de technologies et politiques. En observant les quantités totales d'émissions étudiées pour 2025 et 2030, il est possible de voir que c'est ce scénario « *business as usual* » qui émet le plus d'émissions mondiales pour ces deux années avec des taux de 61,0 et 64,7 GtCO₂. Avec les objectifs de l'accord de Paris, ce sont les deux derniers scénarios (lignes) qui devraient influencer le plus les politiques climatiques. Le scénario concernant le maintien de la hausse de température sous 2 °C, les émissions mondiales pour 2025 pourraient descendre à 47,7 GtCO₂/an. Pour le scénario concernant le maintien de la hausse de température sous la barre des 1,5 °C, les réductions d'émissions mondiales pourraient être beaucoup plus importantes, diminuant jusqu'à 44,5 GtCO₂ pour 2025 et 36,5 GtCO₂ pour 2030. Afin d'obtenir ces chiffres, ces deux scénarios sont prioritaires et des actions concrètes commencent à apparaître. À la suite de la publication de ces scénarios dans le *GAP Report* par les Nations unies, l'économie mondiale se doit de réduire la consommation et la production d'énergie basées sur les combustibles fossiles, mais aussi d'inclure la décarbonisation à ses stratégies contre les changements

climatiques. Les stratégies favorisant le changement de source d'énergie pour des énergies plus vertes peuvent mener à des réductions des polluants climatiques de courte durée de vie comme le carbone noir, le méthane, l'ozone troposphérique et les hydrofluorocarbures (HFC) (Gouvernement du Canada, 2017). La stratégie de décarbonisation, elle, se concentre sur le retrait du CO₂ de l'atmosphère à l'aide de technologies telles que la capture et séquestration du carbone. Le retrait du carbone à l'aide de ces technologies développées et les approches d'émissions négatives de GES doivent être combinés à la mise en place d'options de réduction comme la conversion des énergies fossiles pour des énergies renouvelables. Comme le mentionne l'UNEP dans son rapport de 2017 (*The Emissions Gap Report 2017 – A UN Environment Synthesis Report*) : « Au-delà de 2030, ces technologies pourraient présenter un potentiel de réduction supplémentaire important ». Ainsi, les technologies de capture du carbone combinées aux autres technologies de réduction d'émissions permettront de réduire les émissions mondiales au zéro net. (Federal Control of Greenhouse Gas Emissions, 2012) Mise à part l'approche des technologies de capture du carbone, il existe d'autres approches qui permettraient de réduire les émissions de CO₂ causées, entre autres, par la hausse croissante de la demande en énergie mondiale. La figure 1.2 résume visuellement les principales stratégies concernant les technologies de réduction d'émissions de carbone. Parmi celles-ci, il est possible de retrouver les techniques plus naturelles, à moindre coût, mais dont le risque de retour du CO₂ dans l'atmosphère est plus élevé. Le reboisement est la première méthode illustrée et consiste en la plantation d'arbres pour augmenter la capture du carbone des forêts. Ensuite, il y a l'utilisation du biocarburant, matière formée à la suite d'une exposition à haute température de la biomasse (Cha et al., 2016) Il y a plusieurs utilisités au biocarburant dont la réhumification des sols, la gestion des déchets, mais surtout la capture et séquestration du CO₂ dans le sol. Une autre méthode naturelle présentée consiste en la restauration ou la gestion des sols afin d'augmenter leur capacité de séquestration du carbone, par exemple les milieux humides. (UNEP, 2017) À l'inverse, le côté technologique des stratégies présentées dans la figure 1.2 énonce des technologies plus du type géo-ingénierie. Elles sont beaucoup plus coûteuses que les stratégies naturelles, mais ont une permanence de séquestration plus élevée. D'abord, il y a les réactions des minéraux naturels pouvant réagir avec le CO₂ pour former de nouveaux minéraux. Ensuite, il y a la technologie du *direct air capture* (DAC) qui consiste en le retrait du CO₂ de l'air ambiant et de soit le séquestrer ou de l'utiliser dans d'autres secteurs. Il y a aussi la méthode qui consiste en l'ajout de matériaux alcalins dans l'océan afin d'optimiser la rétention du CO₂ atmosphérique captée par les océans en plus de contrer l'acidification. Enfin, la dernière stratégie technologique est de capturer le CO₂ de l'atmosphère et séquestrer dans des matériaux particuliers. Finalement, une combinaison des deux est suggérée comme stratégie naturelle et technologique. Il s'agit de la bioénergie avec la capture et séquestration du carbone (BECCS). Cette stratégie offre aux centrales émettrices d'utiliser la biomasse qu'elles convertissent en énergie et les émissions de CO₂ provenant de cette réaction sont séquestrées. (UNEP, 2017) Comme la biomasse utilise le CO₂ comme source de nutriment, cette stratégie capture et séquestre en double et permet d'avoir des émissions négatives de CO₂ (The Institute for Carbon Removal Law and Policy, 2018).

2 LA SÉQUESTRATION OU LA VALORISATION DU CARBONE

Les technologies de CSC et de CUC, une fois le carbone capturé, peuvent soit séquestrer le carbone dans divers réservoirs ou utiliser ce carbone et le valoriser sous différentes formes. Ce chapitre expliquera d'abord en quoi consiste la chaîne de CSC qui mène à la séquestration ou bien la valorisation du carbone. Ensuite, l'approche de la capture, de la séquestration et de l'utilisation seront expliquées plus en détail et feront part de l'analyse. Toutefois, une question se pose : est-ce que ces approches sont liées directement à l'étape de capture ou bien, une fois capturé, un choix s'impose à savoir si le CO₂ est séquestré ou valorisé ?

2.1 La chaîne de capture et séquestration du carbone

La technologie de capture du carbone comprend plusieurs étapes avant de séquestrer le CO₂ dans différents réservoirs ou de valoriser ce gaz sous d'autres formes. Les différentes étapes de la capture du carbone sont regroupées sous le terme de « la chaîne de capture et séquestration du carbone » dans plusieurs documents sur le sujet (The Carbon Capture & Storage Association, 2019; Wellenstein et Slagter, 2011; Bui et al. 2018). La figure 2.1, ci-dessous, présente les différents processus de la chaîne CSC. Celle-ci peut comporter trois ou quatre étapes, incluant ou non la source de production de CO₂. Bref, dans le cas de la figure 2.1, quatre processus sont présentés dont le premier est la production, suivie par la capture, le transport et finalement, l'injection ou la séquestration.

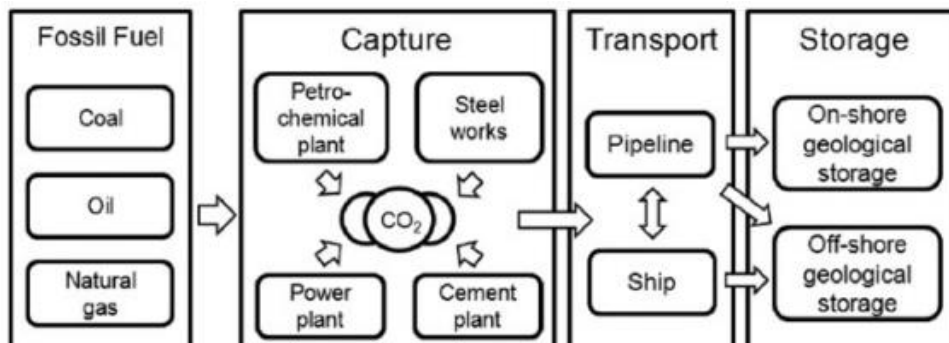


Figure 2.1 Les processus de la chaîne de capture et séquestration du carbone (Gim et al. 2013)

2.1.1 Production et capture dans la chaîne CSC

Le processus de production, parfois exclu de la chaîne de CSC, consiste en la production du CO₂ par les centrales électriques ou les installations industrielles. Cette étape est la source du CO₂ à la base de la technologie de CSC. L'étape de la capture du carbone consiste en des technologies pouvant capturer le CO₂ produit lors des procédés industriels. Ces technologies servent à séparer le dioxyde de carbone par différentes méthodes, entre autres par la précombustion, postcombustion et oxycombustion. (CSC Association, 2019) La méthode de précombustion est caractérisée par l'utilisation d'un système permettant entre autres de convertir un combustible solide, liquide ou gazeux en un mélange d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Celle de postcombustion consiste en la capture du dioxyde de carbone dès la sortie

du processus de combustion. Puis, la méthode d'oxycombustion consiste globalement en la capture du CO_2 à la suite de la combustion d'un combustible à partir d'oxygène pur au lieu de l'air. (The Carbon Capture & Storage Association [CSCA], 2019)

2.1.2 Transport dans la chaîne CSC

Le transport du CO_2 est fait de manière sécuritaire du site de production et de capture jusqu'au site d'enfouissement. La figure 2.2 présente les points importants du cheminement du CO_2 , dont son transport à partir des installations de capture jusqu'au lieu de séquestration. La figure 2.2 présente la possibilité de transporter le CO_2 des installations pour se diriger vers la côte par pipelines terrestres, afin d'être séquestré dans des aquifères salins. Le CO_2 peut aussi être transporté par bateau ou par pipelines sous-marins jusqu'à une station de séquestration géologique marine. Le transport du CO_2 peut donc se faire de diverses façons, principalement par pipelines, camions et rails ou bateaux. C'est une fois arrivé à la station de stockage que le CO_2 est enfoui dans les couches géologiques du sol terrestre ou marin. Cependant, le transport vers la côte n'est qu'une des options de transport à des fins de séquestration du carbone. Il y a aussi la possibilité de transporter le CO_2 par pipeline terrestre vers une autre industrie utilisant le CO_2 dans ces procédés. Il est aussi possible de transporter le CO_2 par voie terrestre pour de la séquestration géologique. Dans certains cas, le lieu de séquestration se situe au même endroit que les installations de capture et aucun transport de longue distance n'est requis. Dans ce cas, seuls des pipelines sont nécessaires pour transporter le CO_2 au site d'injection.

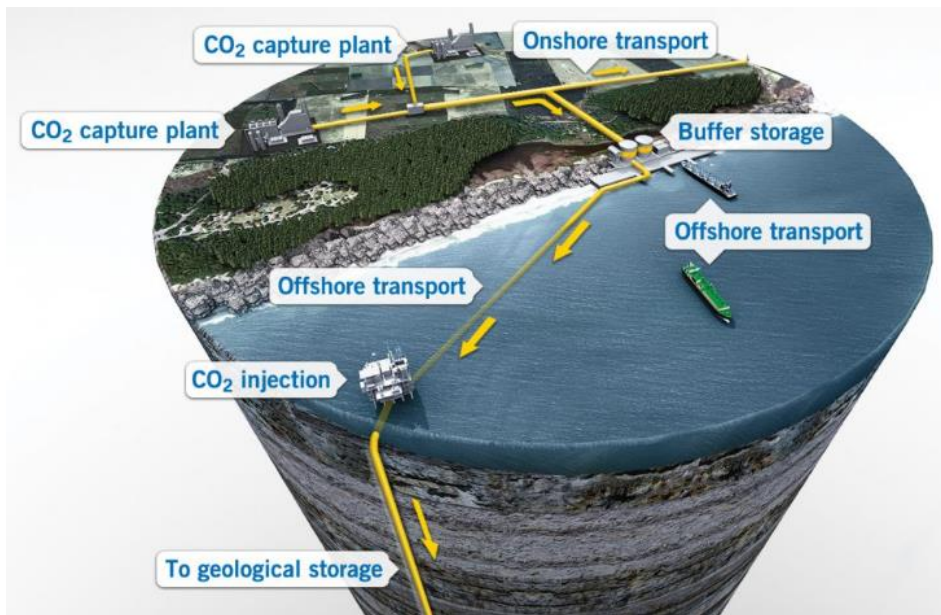


Figure 2.2 Méthodes de transport du dioxyde de carbone capturé à des fins de séquestration (Global CCS Institute, 2018c)

Comme dit précédemment, le transport est nécessaire lorsque le lieu de séquestration n'est pas à proximité du lieu de production de CO₂. C'est le transport par pipeline qui est néanmoins la méthode la plus utilisée pour transporter les grandes quantités de CO₂ capturées par les industries et les centrales qui sont équipées des systèmes de capture. (Global CCS Institute, 2018c) Le transport par camion ou par train est une seconde option pouvant être envisagée, mais qui n'est possible que pour le transport de faibles quantités de CO₂. En effet, les quantités pouvant être transportées par camion dépendent de la capacité de transport du réservoir, mais aussi de la distance qu'il doit parcourir entre les installations de capture et le site de séquestration (Norişor et al., 2012). Pour que cette option soit faisable, les sources de CO₂ et le lieu de séquestration doivent être à proximité. De plus, la quantité transportée ne doit pas être trop élevée puisque les moyens de transport terrestre ont une capacité de transport limitée par voyage. (Global CCS Institute, 2018c) Considérant les projets en matière de capture et séquestration de carbone à long terme, les quantités de CO₂ capturé par les technologies de CSC augmenteront, rendant le transport terrestre de plus en plus nécessaire. Finalement, le transport par bateau est une option alternative aux deux précédentes. Elle est actuellement utilisée pour le transport de faible volume de CO₂, soit moins de 1500 m³, et principalement pour l'industrie chimique. (Santos, 2012) Dans le cadre du transport de CO₂ pour la CSC, des bateaux pouvant transporter de plus gros volumes seront nécessaires.

2.1.3 Séquestration dans la chaîne CSC

L'étape de la séquestration est la dernière de la chaîne CSC. Elle contribue à stocker le CO₂ produit par les activités humaines et capturé tout au long de la chaîne, dans le sous-sol terrestre ou sous-marin afin d'aider à lutter contre les changements climatiques. Les puits de séquestration les plus utilisés pour le stockage géologique sont les sous-sols terrestres et marins. (Global CCS Institute, 2018d) La question qui revient à la fin de cette chaîne est : est-ce que les étapes sont interreliées ou peuvent-elles être dissociées? Il semble possible de pouvoir capturer le CO₂, mais de ne pas le séquestrer. En effet, une fois le CO₂ capturé et compressé pour le transporter à l'aide de pipelines, il est possible d'y trouver une utilisation alternative. Cette nouvelle utilisation du CO₂ permet d'en tirer des avantages pouvant être utiles à la société et permet de créer de nouvelles technologies basées sur le CO₂. Toutefois, il est important de noter que l'utilisation du carbone n'est pas une étape dans la chaîne CSC et est plutôt cheminement de capture à part faisant partie de la CUC.

2.1.4 La séquestration du carbone

La séquestration est l'étape de la chaîne CSC qui permet d'enfouir le dioxyde de carbone capturé par les différentes technologies. Lorsque la séquestration est utilisée, il est important de prendre en considération la capacité du réservoir à stocker à long terme le CO₂. En effet, selon Rahman (2017), si le CO₂ avait à émerger des puits de stockage pour se répandre dans l'atmosphère, il faudrait que cela se produise après le pic d'exploitation des énergies fossiles, dont l'année varie selon les études et selon l'utilisation au jour le jour. Chapman (2014) révèle que l'année dépend de la source et de la date à laquelle elle a été prédite.

Autrement dit, les réservoirs doivent avoir une capacité de stockage à long terme, car si le CO₂ capturé venait à être relâché par accident, et ce, avant la fin du pic d'exploitation des énergies fossiles, le taux de CO₂ atmosphérique pourrait atteindre des concentrations au-delà de celles observées jusqu'à présent. Ce phénomène pourrait avoir de graves conséquences environnementales et sociales.

Ainsi, en choisissant le lieu de séquestration, des critères doivent être pris en considération afin d'évaluer les sites potentiels. Les critères énumérés ci-dessous sont tirés de Rahman et al. (2017) :

- Le lieu de séquestration doit pouvoir contenir le CO₂ injecté sur une longue période de temps, soit des centaines d'années préférablement;
- Les coûts financiers doivent être minimisés, et ce, pour le stockage et le transport du CO₂ de la source au lieu de séquestration;
- Le risque d'accident doit être au plus faible ou même éliminé;
- Les impacts environnementaux doivent être minimisés;
- Les méthodes de séquestration ne doivent violer aucune loi nationale ou internationale.

2.1.5 La séquestration biologique

Avant d'entamer l'aspect de la séquestration par des technologies, il est important de comprendre qu'à la base, la séquestration est réalisée naturellement par la photosynthèse. Cette séquestration biologique est favorisée par des pratiques telles que la reforestation, la diminution de la déforestation, la séquestration du carbone par les sols agricoles et par l'utilisation de microorganismes pouvant séquestrer le CO₂ naturel et anthropique. D'autres méthodes de séquestration biologique sont mises de l'avant pour améliorer les technologies de CSC telles que les algues, les bactéries et les cyanobactéries. (Kumar, 2018)

La séquestration peut aussi consister en l'enfouissement géologique du CO₂ et peut se faire autant dans le sol terrestre que sous-marin. Comme l'illustre la figure 2.3, la séquestration peut se faire dans différents réservoirs géologiques tels que des réservoirs de pétrole et de gaz vides, des formations salines profondes marines et terrestres, et des formations rocheuses de basalte. Le CO₂ peut aussi être séquestré profondément dans l'océan et séquestré par carbonatation minérale. (World Coal Association, 2019) Non illustrés sur la figure 2.3, d'autres sites ayant les caractéristiques requises peuvent servir de site de stockages. Ces formations rocheuses doivent soit :

- Être vides ou poreuses;
- Avoir une perméabilité suffisante pour recevoir les quantités de CO₂;
- Avoir une couverture rocheuse assez vaste pour contenir le CO₂ dans la formation rocheuse de façon permanente. (CCS Global Institute, 2018)

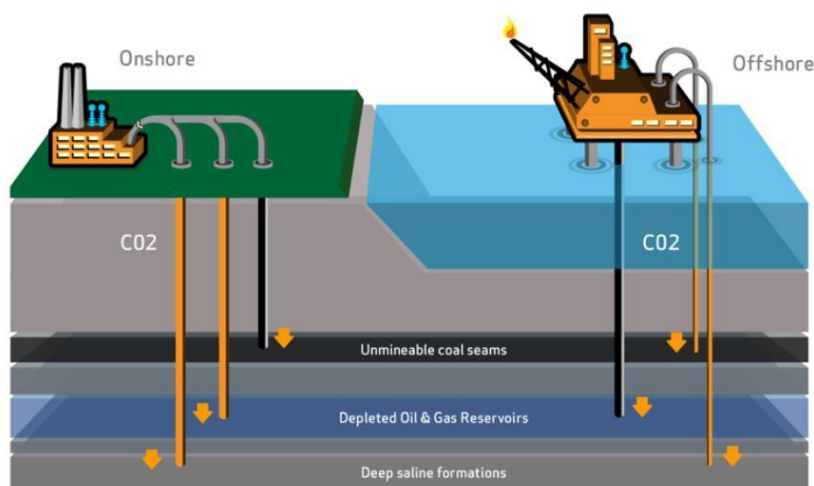


Figure 2.3 Quelques réservoirs de séquestration du CO₂ (World Coal Association, 2019)

Ces trois réservoirs présentés à la figure 2.3 sont les bandes de charbon inexploitation (*unmineable coal seams*), les réservoirs de gaz ou de pétrole épuisés et les aquifères salins. Ces lieux de séquestration ne relèvent pas de la fiction et sont actuellement utilisés comme réservoirs de stockage du CO₂. Deux compagnies utilisant deux de ces réservoirs sur trois feront part de l'analyse au chapitre quatre.

2.1.6 Séquestration géologique

La séquestration géologique implique l'enfouissement du CO₂ dans les couches terrestres. La figure 2.4, présentée ci-dessous, démontre quelques options possibles en termes de séquestration géologique.

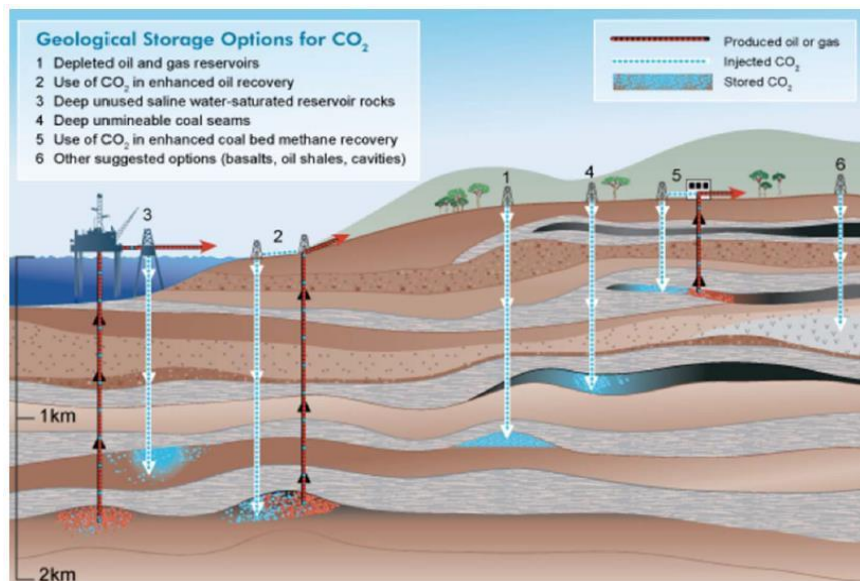


Figure 2.4 Représentation de quelques options de séquestration géologique (Aminu, 2017)

Sur la figure 2.4, six options sont présentées parmi celles qui sont possibles selon les connaissances actuelles dans le domaine. La séquestration géologique est le recours à des réservoirs de pétrole ou de

gaz vides et est la première option présentée sur la figure 2.4. Après avoir été vidé des hydrocarbures qui s'y retrouvaient, ces réservoirs sont vides et sont souvent idéaux pour la séquestration du CO₂ à cause de ses nombreux avantages. En effet, ces réservoirs ont été le sujet d'études spécifiques et détaillées avant l'exploitation des hydrocarbures, incluant la capacité de stockage du réservoir. Ces réservoirs sont aussi munis d'infrastructures déjà présentes telles que des puits d'injection et des pipelines. Ces infrastructures n'ont qu'à être légèrement modifiées pour être utilisées dans le processus de stockage géologique du carbone. (Aminu, 2017)

Les injections de CO₂ pouvant être utilisées à des fins de récupération d'hydrocarbures pour améliorer le rendement d'extraction par pompage des hydrocarbures constituent la seconde option de séquestration géologique présentée à la figure 2.4. Dans le cadre de cet essai, ce procédé sera considéré comme une utilisation du CO₂ capturé et sera expliqué plus en détail dans le chapitre 2.2 sur l'utilisation du carbone.

La séquestration dans des aquifères salins constitue la troisième option présentée à la figure 2.4. Selon Aminu (2017), ce lieu de stockage est considéré comme l'une des options les plus faisables étant donné son large volume de stockage ainsi que sa formation poreuse et perméable. Bien que ces réservoirs ne soient pas utilisés, les coûts financiers sont très élevés pour créer et installer les infrastructures nécessaires à l'enfouissement du CO₂ dans ces aquifères. Cet aspect économique réduit l'intérêt à se diriger vers ce type de réservoirs.

La séquestration du CO₂ sous les couches de charbon qui ne sont pas exploitées est la quatrième option de séquestration de la figure 2.4. Cette option est favorable, car ces couches dans le sol sont perméables et contiennent un nombre important de microspores. Jumelée avec la cinquième option que constitue la séquestration du CO₂ dans des mines de charbon inexploitées, l'injection du CO₂ dans ces réservoirs remplacerait le méthane qui est pompé par les puits (méthode très semblable à la récupération assistée du pétrole (RAP) présenté à l'option deux) . Cette option permet d'injecter le CO₂ capturé par les technologies de CSC en plus d'améliorer la rentabilité et l'efficacité des puits de méthane. Ce procédé permet d'accélérer la récupération du méthane, mais ne vient pas augmenter les quantités produites. (Aminu, 2017) Cette option, comme la seconde, peut être vue comme une utilisation ou valorisation du carbone puisqu'elle utilise le carbone capturé à d'autres fins que de seulement le séquestrer. Comme le CO₂ peut être utilisé pour améliorer le rendement, cette méthode serait classée comme de la CUC.

Finalement, la séquestration géologique dans les formations rocheuses de basaltes est décrite comme pouvant être la sixième option. Ces formations composent principalement le fond de l'océan et offrent un grand potentiel de stockage. En effet, les formations de basaltes sont réactives et sont composées d'ions métalliques Ca²⁺ permettant possiblement de fixer le CO₂ en carbonate de calcium (CaCO₃) à une échelle de temps géologique. (Aminu, 2017) Ce procédé est utilisé dans le cadre du projet CarbFix et sera expliqué plus en détail dans le chapitre trois.

2.1.7 Séquestration profonde dans l'océan

Cette solution de remplacement à la séquestration géologique offre une possibilité de stocker le CO₂ capturé lors de la chaîne CSC dans les profondeurs de l'océan. À la base, l'océan capte et séquestre déjà naturellement le CO₂ atmosphérique. Cette option pourrait être envisagée, car les fonds océaniques pourraient séquestrer le CO₂ pour des centaines d'années. L'approche de séquestration dans le fond océanique proposée dans l'article d'Aminu (2017) est basée sur la dissolution du CO₂ dans l'eau salée. Injecté à l'aide de colonne dans le fond océanique, le CO₂ liquide réagira avec l'eau salée pour former des bicarbonates (Figure 2.5). Les principaux paramètres permettant d'évaluer l'efficacité et la durabilité de la séquestration océanique sont la profondeur de l'injection, le temps de résidence et la distribution de concentration en CO₂. (Aminu, 2017) Ce procédé, encore en phase théorique, est toutefois controversé puisque, premièrement, il y a un risque potentiel d'acidification de l'eau autour du point d'injection. Deuxièmement, plusieurs réglementations internationales interdisent le rejet de polluants industriels dans les océans. Comme le CO₂ est capturé à la suite de la combustion fossile anthropique est possiblement considérée comme un rejet industriel, il n'est pas encore certain que le stockage dans l'océan du CO₂ capturé par des technologies de CSC puisse être permis. Cette situation reste encore ambiguë, considérant qu'en 2006, le Protocole de Londres a émis un amendement permettant une considération du procédé de stockage du CO₂ dans le sous-sol géologique marin. De plus, d'autres conventions internationales comme La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (Convention OSPAR) mentionnent que le CO₂ ne peut être enfoui que sous autorisations ou permis distribués par une autorité liée.

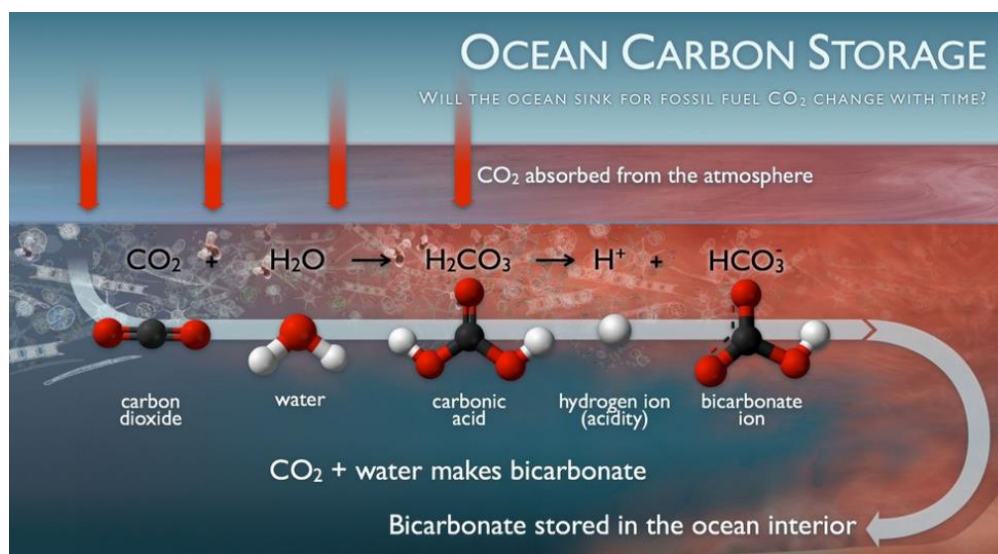


Figure 2.5 Réactions chimiques de la séquestration du carbone dans l'océan (Center for Environmental Visualization, 2014).

2.2 L'utilisation du carbone

La capture et utilisation du carbone (CUC) favorise la réutilisation du CO₂ capturé au lieu de seulement le séquestrer. Cette valorisation du CO₂ est de plus en plus attrayante, considérant ses nombreux bénéfices environnementaux ou même ses propriétés chimiques et physiques (Bennett, Schroeder and McCoy, 2014). L'utilisation ou la valorisation du CO₂ est vue comme une solution alternative à la séquestration géologique. Comme mentionné précédemment, l'utilisation du carbone est une division distincte de la séquestration. Illustrée dans la figure 2.6, l'utilisation comprend deux sous-divisions, soit la conversion ou la non-conversion. Dans cette dernière, il est possible de retrouver la RAP, expliquer dans la section suivante, et la récupération assistée des gaz et du méthane (non discuté dans cet essai). Si le CO₂ est converti, il peut être utilisé pour de la carbonatation minérale, utilisé de façon biologique dans la culture d'algue ou pour des procédés chimiques tels que la confection de combustibles liquides, méthanol, biocarburants, polymères, etc. (International Energy Agency, 2019b)

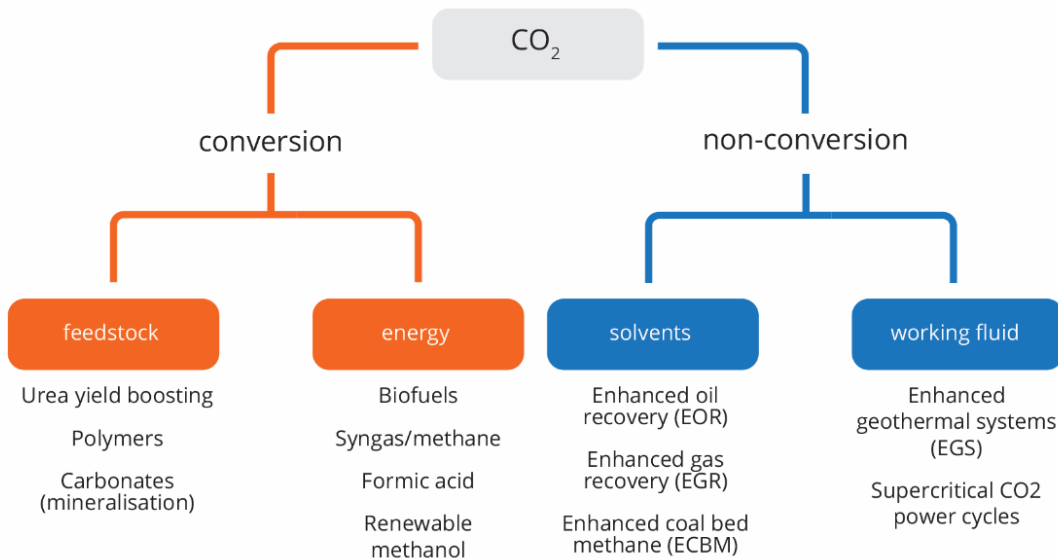


Figure 2.6 Options possibles de CSC et CUC (International Energy Agency, 2019b).

2.2.1 La récupération assistée du pétrole

Les compagnies pétrolières tentent de maximiser le taux de récupération du pétrole puisque leur économie est basée sur cette ressource. Ces compagnies tentent d'augmenter ce taux des réserves déjà exploitées puisqu'il est de plus en plus difficile d'exploiter de nouveaux gisements qui, souvent, se retrouve dans des environnements dangereux ou inexploitable. En 2014, le taux de récupération des réserves de pétrole mondiales se situait à environ 20 à 40%. (Muggeridge et al., 2014) Afin de maintenir le taux le plus élevé, plusieurs techniques sont utilisées dont la récupération assistée du pétrole. Comme présenté à la figure 2.7, cette technique est principalement utilisée pour augmenter le taux de récupération du pétrole et consiste en l'injection géologique du CO₂ pour favoriser la circulation de l'hydrocarbure dans les systèmes

de pompage. (IEA, 2017) En revanche, la majorité du CO₂ utilisée dans ce processus ne provient pas de la capture et séquestration du carbone anthropique, mais est extrait des puits naturels souterrains. (IEA, 2017) La majorité des documents favorisant l'explication de cette technique ne fait pas mention des faits controversés de vouloir séquestrer du carbone anthropique pour améliorer l'efficacité des systèmes de pompage des combustibles fossiles. Il est à se demander si cette pratique devrait vraiment être considérée comme une valorisation du CO₂ étant donné qu'elle favorise l'extraction d'hydrocarbure, dont son utilisation est à la base de la création des technologies de CSC. Considérant aussi le fait que la majorité du CO₂ utilisé dans la pratique de récupération du pétrole provient de capture du carbone d'origine naturelle et non celle d'origine anthropique, cela peut démontrer que l'utilisation du carbone anthropique capturé n'est pas encore assez valorisée.

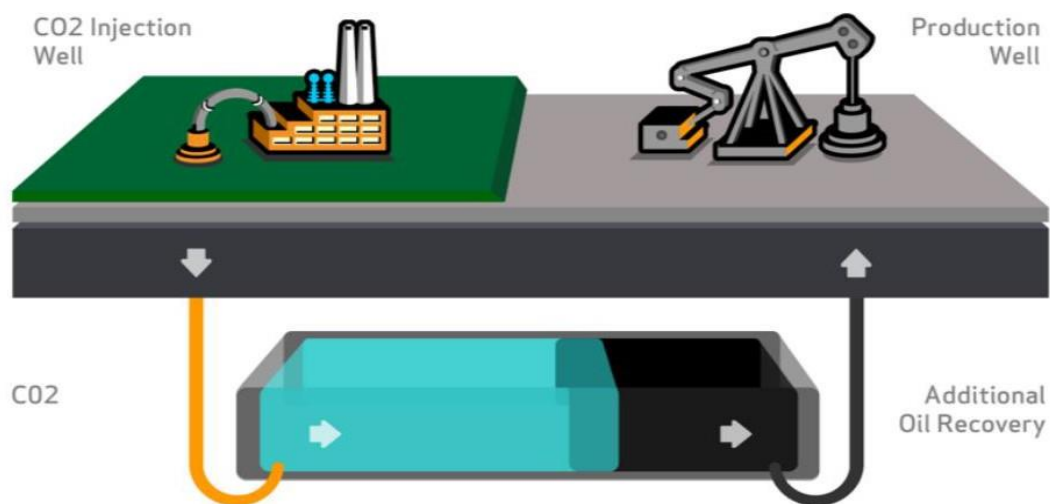


Figure 2.7 Utilisations du CO₂ pour la récupération du pétrole (World Coal Association, 2019)

2.2.2 Le biocarburant et autre dérivé provenant des algues

La combinaison de la capture et utilisation du CO₂ dans la production de biocarburant est une valeur à long terme étant donné les grandes quantités de CO₂ pouvant être capturées par les différentes technologies. L'application du biocarburant est une solution de remplacement durable, qui est compatible avec les moteurs à combustion actuels, est faite à partir d'une source d'énergie renouvelable, émet peu de CO₂ lors de la combustion et a un impact socioéconomique positif. (Rahman, 2017) À plus long terme, l'utilisation du biocarburant pourrait avoir un impact positif puisqu'il est un produit dérivé de la cellulose, des algues ou des déchets, ce qui éviterait des conséquences environnementales que peuvent produire d'autres types de carburant écologique comme l'éthanol.

Les microalgues font partie d'une des méthodes d'utilisation du carbone, plus particulièrement, dans le domaine biologique. Les microalgues peuvent capturer le CO₂ et l'utiliser de diverses façons. Elles utilisent les émissions de CO₂ comme source de nutriments, il est possible pour les microalgues de capturer

directement le CO₂ et de l'utiliser par la suite. Les usages qui sont estimés des caractéristiques des microalgues sont la conception durable de produits dont les biohuiles, produits chimiques, engrais et même des carburants. Elles ont l'avantage de pouvoir être cultivées sur des terres non arables et dans les milieux d'eau salée. Concernant le taux de capture, il est estimé à environ 0,5 tonne de carbone par tonne de biomasses d'algues. Cette méthode de capture est encore au stade recherche et développement. Il n'y a donc pas encore de mise en œuvre commerciale. (Styring, 2011; Singh et Dhar, 2019) Bref, l'application qu'amène le biocarburant favorise la sécurité énergétique, diminue les conséquences environnementales, réduit l'utilisation des combustibles fossiles et permet d'améliorer les échanges socioéconomiques et la durabilité des ressources. (Rahman, 2017)

2.2.3 La carbonatation minérale dans la roche

La carbonatation minérale est un procédé dans lequel « le CO₂ réagit chimiquement avec des minéraux contenant du calcium ou du magnésium pour former des matériaux carbonates stables qui ne sont pas assujettis à une responsabilité à long terme ni à des obligations de surveillance. » (Olajire, 2013). Il s'agit donc d'une réaction chimique se produisant entre le CO₂ et les minéraux du sol dans le but de créer une roche carbonatée tout en séquestrant le CO₂ de façon permanente. Ce procédé est à la base de la technologie utilisée par le projet CarbFix en Islande et sera expliqué plus en détail au chapitre trois.

Selon Aminu (2017), la méthode de carbonatation minérale est une solution différente de la séquestration géologique et océanique, et correspond à l'utilisation du CO₂ capturé afin de former de la roche carbonatée. Ce processus fait réagir le CO₂ avec les métaux alcalinoterreux comme le calcium ou le magnésium pour former des carbonates stables. Il peut y avoir deux types de réactions : in situ (dans le sous-sol terrestre) ou ex situ (sur la surface terrestre). La première correspond à l'injection du CO₂ dans les réservoirs souterrains afin de créer une réaction entre le CO₂ et les minéraux alcalins présents dans les formations géologiques. Cette réaction forme les carbonates. La réaction ex-situ correspond à la carbonatation minérale du CO₂ à l'aide de processus de la surface terrestre, incluant la formation de roches. Contrairement à la séquestration géologique, la séquestration par carbonatation minérale est permanente, sûre et ne nécessite pas de surveillance à long terme. Comme il est mentionné dans l'article A review of mineral carbonation technologies to séquestre CO₂ (Sanna, 2014) :

« La stabilité inhérente à la carbonatation minérale est confirmée par la distribution du carbone dans la lithosphère terrestre, où environ la moitié du carbone total est sous forme de calcaire (CaCO₃) et d'autres types de carbonates. »

Comme la lithosphère est composée en forte majorité de carbonates et de silicates, le potentiel de séquestration est beaucoup plus important et peut s'élever à plus de 10 000 gigatonnes de carbone séquestrées tous les 100 ans. (Sanna et al., 2014)

3 PROJETS DE CAPTURE ET SÉQUESTRATION OU UTILISATION DU CARBONE

Le récent rapport du Global CCS Institute (2018) fait mention que « les objectifs de l'accord de Paris ne peuvent être atteints sans la capture et séquestration du carbone ». Selon cette source, les technologies de CSC sont, à ce jour, les seules à pouvoir décarboniser ou réduire la part des émissions de GES provenant des plus grands émetteurs industriels. En effet, les technologies de CSC sont de plus en plus considérées comme un élément nécessaire dans la réduction des émissions de CO₂, mais aussi dans le retrait du CO₂ de l'atmosphère. Pourtant, actuellement, la contribution globale des technologies de CSC nécessaire pour atteindre les objectifs de réduction de l'accord de Paris est loin d'être ce qui était espéré. En effet, afin de limiter la hausse des températures globales sous les 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, 2500 installations de CSC devront être en exploitation d'ici 2040. Cette prévision est estimée en prenant compte des installations ayant une capacité minimale de capture de 1,5 Mt de CO₂ par an. À ce jour, peu nombreuses sont les installations de CSC pouvant capturer minimalement cette quantité. (Global CCS Institute, 2018) Une majorité de ces installations sont en phase pilote avec un faible rendement ou ces projets sont abandonnés pour différentes raisons telles que le manque de financement ou de politiques publiques. En conséquence, afin d'améliorer la croissance à long terme des technologies de CSC, un nouveau cadre politique mondial ou même international devra voir le jour. (McHugh, 2019)

Depuis environ 2010, une forte croissance dans le nombre de projets de CSC est mondialement constatée. La figure 3.1 présente la capacité de capture des différents projets à grande échelle de CSC ayant été implantés depuis les dernières décennies. Dans le début des années 70, les premiers projets de capture du carbone étaient principalement utilisés par les compagnies pétrolières pour améliorer leur rendement d'extraction à l'aide de la récupération assistée du pétrole (RAP) (bandes bleu foncé). Au fil des années, le nombre de projets de CSC a augmenté, favorisant toujours la récupération assistée du pétrole contrairement à la séquestration géologique. Sans émettre de conclusions hâtives, cela pourrait être favorisé par le contexte économique des dernières décennies, dominé par la croissance ininterrompue de la demande en pétrole. Comme plusieurs pays et gouvernements voient un certain intérêt financier à enfouir le CO₂ pour mieux extraire le pétrole, l'augmentation de ce type de projets de séquestration du carbone pourrait être causée par ce contexte économique et réglementaire. Il en vient à se demander si cela est vraiment le but des technologies de capture du carbone, car la production de pétrole est davantage augmentée par la séquestration du CO₂ dans les réserves de pétrole. Comme le pétrole alimente les industries, les moyens de transport et se retrouve dans divers produits à usage unique, s'agit-il d'un cercle vicieux qui ne se terminera que lorsque les réserves pétrolières seront épuisées? La réponse à cette question varie selon les opinions et sera discutée plus en détail dans le chapitre quatre. Malgré cela, il est possible de voir une augmentation des capacités de capture dédiées à la séquestration géologique. En effet, depuis environ 2014, la capacité de capture du CO₂ est davantage augmentée, et ce, par la création de nouvelles technologies de CSC et potentiellement, d'utilisation du carbone.

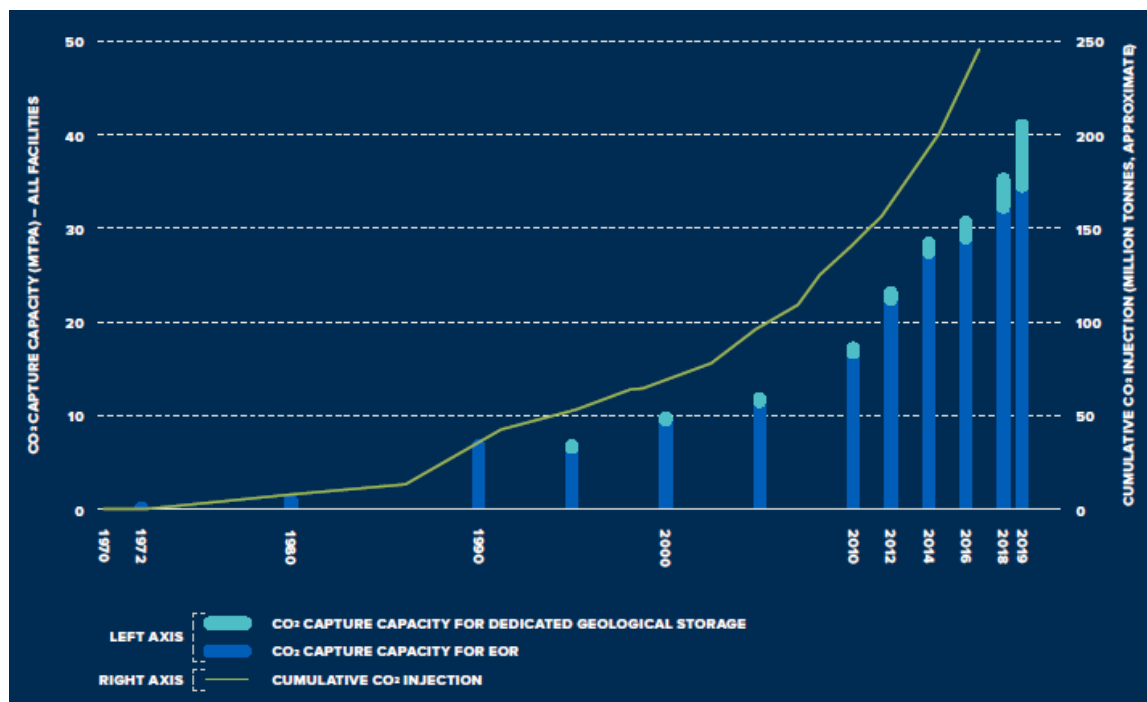


Figure 3.1 Capacités de capture du carbone annuelle et injections cumulatives annuelles de CO₂ pour les installations de CSC et CCU de RAP (Global CCS Institute, 2018)

Au travers de ce chapitre, différents projets de capture, séquestration ou valorisation du carbone seront présentés. À la suite de recherches, certaines organisations avaient déjà créé une liste de projets de capture et séquestration ou utilisation du carbone (CSUC) à grande échelle. Tout d'abord, le site internet de l'Agence Internationale de l'Énergie présente une carte interactive de plusieurs de ces projets à échelle internationale au niveau industriel, énergétique ou en construction. La liste comprend 23 projets internationaux, dont la majorité est liée à des activités industrielles. Cette carte interactive comprend une base de données pour chaque projet présenté sur la carte. Des informations plus précises pour chaque projet sont disponibles telles que le secteur d'activité, le taux de capture, la source d'énergie pour créer le CO₂, le type de capture, le type transport et le type de séquestration ou valorisation. (International Energy Agency, 2019) Le Global CCS Institute possède également une base de données d'installations de CSC et CUC à l'échelle internationale. Cette base de données divise les installations par région, pays et catégorie. Le terme catégorie comprend :

- Les installations à grande échelle de capture et séquestration du carbone;
- Les initiatives classées « autres »;
- Les installations pilotes de CSC;
- Les centres de tests;
- Les installations d'utilisation du carbone.

Cette base de données rassemble aussi plusieurs informations supplémentaires telles que le statut du projet, l'année de construction, le pays de provenance, le secteur d'activité et la capacité de capture du projet.

Une courte liste de plusieurs projets a été élaborée à l'aide des bases de données du Global CCS Institute et de l'Agence International de l'Énergie pour ensuite réduire le nombre de projets à cinq. Les cinq projets choisis ont été sélectionnés selon plusieurs variables, dont le type de capture et le taux de capture, afin de couvrir le plus de projets aux technologies différentes. Ces variables (décrites au chapitre quatre) permettront l'analyse de ces projets lors du prochain chapitre.

3.1 Sleipner CO₂ Storage, Norvège

Le projet Sleipner CO₂ Storage est un projet commercial d'injection de CO₂ provenant de la capture du carbone. Il a été mis en opération dans les années 90, à la suite de la découverte de la poche de gaz Sleipner dans la mer du Nord en 1974, près de la Norvège (Furre et al., 2017). En 1998, la poche de gaz naturel était estimée à 173×10^9 mètres cubes (m³) de gaz naturel extractible ainsi que 98 millions de m³ de gaz condensés (Kongsjorden, 1998). Selon l'article de Helge Kongsjorden, publié en 1998, non loin après le début des opérations du projet Sleipner CO₂ Storage, les quantités de CO₂ capturées suite aux procédés d'extraction du gaz naturel étaient estimées à 1 million de tonnes de CO₂ par année. L'option la plus facile pour la compagnie était d'émettre le dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Kongsjorden, 1998). Durant ces mêmes années, le gouvernement de la Norvège avait mis en place une nouvelle taxe concernant les émissions de CO₂ en mer. La compagnie Statoil, étant en développement du projet de récupération du gaz de la poche de gaz naturel Sleipner, a décidé de ne pas émettre ces émissions de CO₂ dans l'atmosphère, mais de les séquestrer dans un aquifère salin, plus précisément dans la formation Utsira. Cet aquifère salin se situe à 1000 mètres sous les installations du projet Sleipner CO₂ Storage et possède une épaisseur d'environ 50 à 250 mètres (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010). La figure 3.2 présente un schéma des installations du projet Sleipner CO₂ Storage. Le schéma expose la profondeur du réservoir de gaz naturel Sleipner, beaucoup plus profonde que la formation Utsira, où le CO₂ est séquestré. Afin de s'assurer que la formation ou le réservoir sont adéquats, certains paramètres doivent être vérifiés avant la séquestration : la perméabilité, la minéralogie, la profondeur et épaisseur du réservoir, la pression, la température et la porosité. (Solomon, 2007)

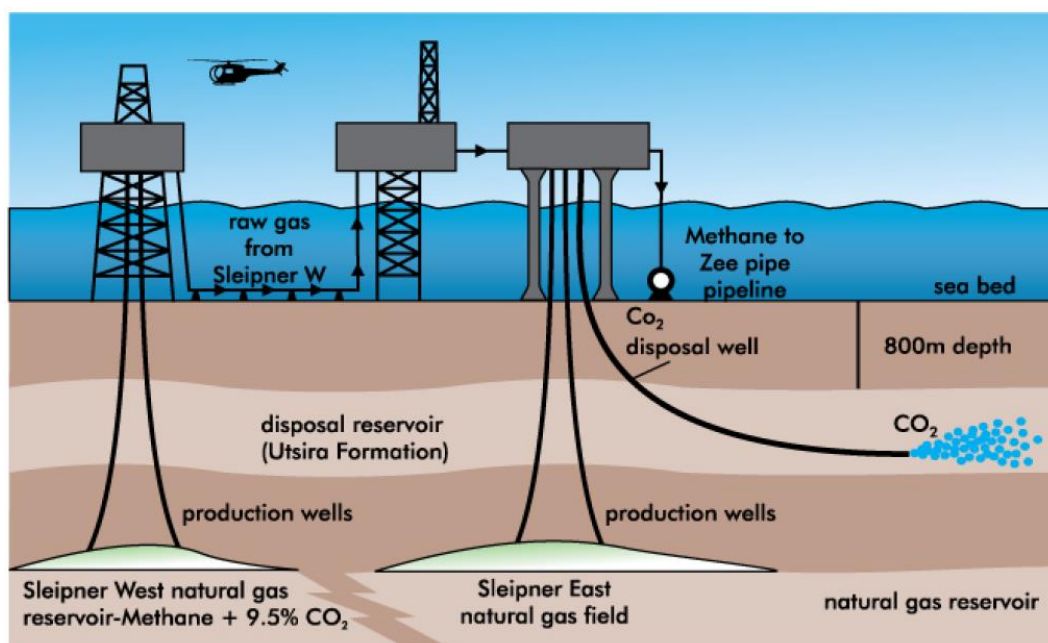


Figure 3.2 Schéma des installations du projet Sleipner CO₂ Storage (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010)

Le CO₂ est capturé par voie postcombustion, c'est-à-dire, une fois la combustion du combustible fossile ou du carburant complétée, à la sortie des cheminées. Le gaz naturel est d'abord extrait et prétraité avant que le CO₂ soit retiré. Ce gaz naturel traité est ensuite envoyé vers le continent européen par pipeline. Le CO₂ est produit par l'extraction conventionnelle du gaz naturel et est capturé grâce à la séparation industrielle avant d'être séquestré. Le CO₂ doit d'abord être converti à un stade critique, c'est-à-dire qu'il doit être chauffé au-delà de sa température critique et comprimé au-delà de sa pression critique (Innovation Fluides Supercritiques, n.d). Dans le cas présent, le CO₂ doit subir une compression à 8 mégapascals (MPa) et être tempéré à 40 °C. L'injection dans la formation Utsira se fait directement sous les infrastructures, le transport par pipeline n'est donc pas nécessaire puisque la formation Utsira se situe juste au-dessus du réservoir de gaz naturel. L'injection se fait par un puits horizontal et, depuis 1996, le projet Sleipner séquestre environ une mégatonne de CO₂ par an. (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010)

Le projet Sleipner CO₂ Stockage est l'un des premiers projets de CSC. Il a permis de démontrer la faisabilité technique de la capture et de la séquestration géologique du carbone en plus de démontrer les faibles impacts environnementaux que la séquestration dans les aquifères salins peut avoir. Un projet de capture de carbone incluant la séquestration comme le projet Sleipner CO₂ Storage possède toujours un risque de fuite. Comme illustré à la figure 3.3, en cas de fuite causée par des fractures, failles ou puits, la contamination et le relâchement de CO₂ peuvent affecter l'eau potable, les écosystèmes en surface et se disperser dans l'atmosphère. (Bruant et al., 2002)

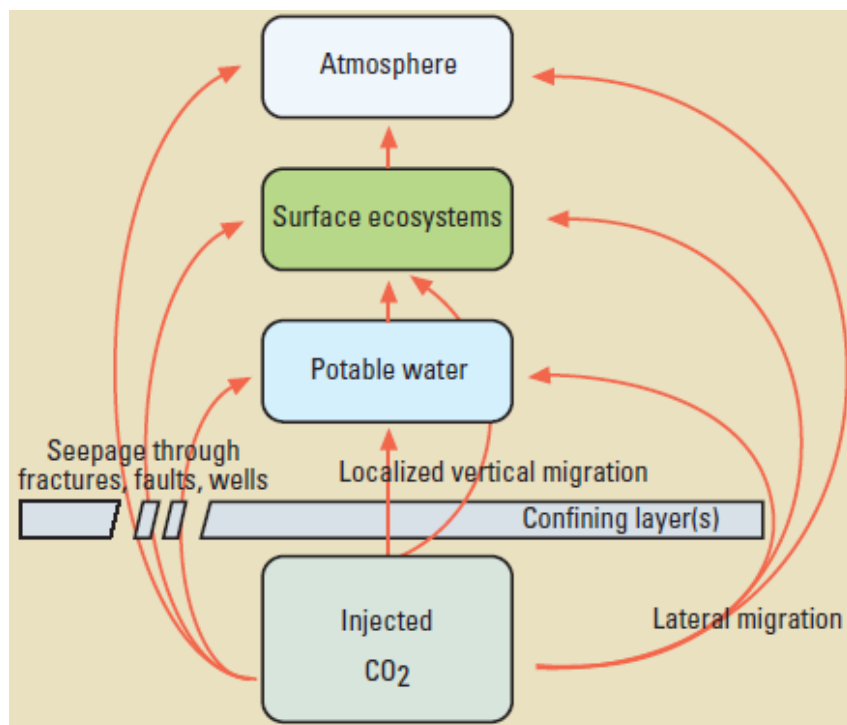


Figure 3.3 Risques de fuite de CO₂ lors d'une séquestration sous-marine (Burant et al. 2002)

C'est pourquoi des systèmes de surveillance en continu sont élaborés afin d'éviter ces fuites de CO₂ provenant des réservoirs. En effet, lors des premières phases de réalisation, le *Saline Aquifer Carbon dioxide Storage Project* (SACS) était un projet de recherche sur la surveillance et la modélisation des opérations de séquestration géologique du projet de gaz Sleipner. Formé de scientifiques, d'instituts et d'autorités gouvernementales de plusieurs pays européens comme la Norvège, le Danemark, les Pays-Bas, la France et le Royaume-Uni, le principal objectif du projet SACS était de collecter des informations sur la séquestration de CO₂ dans la formation Utsira ainsi que d'autres infrastructures similaires. Le projet Sleipner CO₂ Stockage est équipé de systèmes de surveillances pour les séismes et la gravité, permettant d'évaluer entre autres les changements de densité et de saturation dans le réservoir, grâce à ce projet de surveillance. (Solomon, 2007) À ce jour, le projet Sleipner CO₂ Stockage effectue toujours des méthodes de surveillance au niveau de la gravité et des risques sismiques. Avec l'acquisition de nouvelles technologies, les surveillances de la formation Utsira se sont avérées plus détaillées. Les nouvelles modélisations ont permis de mieux comprendre les propriétés du réservoir et de perfectionner les connaissances quant à l'écoulement du gaz durant l'injection. Avec l'optimisation des programmes de surveillance et l'expérience acquise au fil des années par le projet Sleipner CO₂ Storage, la surveillance sismique est devenue l'outil prioritaire grâce à ses taux de réponse optimaux lors de faible concentration de CO₂ et sa grande superficie de captage de données. (Furre et al., 2017)

La liste qui suit présente les quelques particularités de la séquestration en milieu marin, plus précisément, dans un aquifère salin. Cette liste est appropriée au cas du projet de stockage de CO₂ Sleipner sous

l'autorité de la compagnie Statoil et de son réservoir de séquestration : la formation Utsira. Elle détaille les qualités d'un bon réservoir de séquestration géologique qu'il était possible de retrouver dans la formation Utsira au moment de la rédaction de cette liste. Elle présente aussi la capacité de stockage du projet Sleipner CO₂ Storage, les principales caractéristiques de la formation géologique ainsi que les systèmes de surveillance appropriés pour la gestion de la séquestration. La liste a été créée à partir d'informations présentées dans un rapport d'étude de cas du projet Sleipner CO₂ Storage en Norvège, publié en 2007, concernant la sécurité et les problèmes environnementaux. Ces informations sont aussi présentes dans un rapport de surveillance des injections de CO₂ du projet Sleipner CO₂ Storage, publié 20 ans après le début des opérations, soit en 2017 par Furre et al.

Quelques-unes des principales caractéristiques de la séquestration en mer sont énumérées ci-dessous. Les caractéristiques énumérées sont à titre indicatif et proviennent plus particulièrement d'études de cas sur le projet Sleipner CO₂ Storage et de la formation Utsira (Solomon, 2007; Furre et al., 2017).

- Les qualités permettant une séquestration sécuritaire :
 - Perméabilité;
 - Minéralogie;
 - Profondeur et épaisseur du réservoir;
 - Pression;
 - Température;
 - Porosité.
- Capacité de capture annuelle de la formation estimée à 1 mégatonne (Mt) CO₂ depuis 1996. Capacité de séquestration maximale estimée à environ 42 000 Mt CO₂.
- Avantages de la formation Utsira :
 - Formation sédimentaire adéquate pour la séquestration (800-1000 m d'épaisseur);
 - Réservoir étanche;
 - Absence de fissure ou de fracture;
 - Localisation géologique adéquate, aucun réservoir inadéquat à proximité;
 - La formation de sable (Utsira) n'a pas subi de diagenèse importante;
 - Favorise le piégeage hydrodynamique et minéral en raison du long temps de résidence.
- Systèmes de surveillance en place afin d'éviter des fuites ou des catastrophes :
 - Études concernant les microséismes;
 - Caractérisation du réservoir et de la couche de roche scellant celui-ci;
 - Surveillance des processus d'injection de CO₂;
 - Simulation du réservoir et des injections;
 - Caractérisation géochimique.

3.2 CarbFix, Islande

Bien que plusieurs projets et technologies de capture du carbone incluent la séquestration géologique ou dans des aquifères salins, ceux-ci comportent un risque d'échappement lors duquel le CO₂ pourrait retourner dans l'atmosphère. C'est pourquoi des scientifiques se sont penchés sur cette question de risque et ont développé une autre approche permettant de former des minéraux solides avec le CO₂. Le projet de CarbFix consiste en l'injection du CO₂ capturé dans la roche poreuse sous la surface (Matter et al. 2011). Différents facteurs peuvent faire varier le taux de minéralisation du carbone, dont le type de roche dans lequel il est injecté, la pression, la température ainsi que la méthode d'injection. De plus, la carbonatation du CO₂ en minéraux suivant l'injection peut être favorisée si les sols récepteurs sont riches en cations divalents (Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺) et si le CO₂ a été dissout dans l'eau avant l'injection. (Matter et al. 2011) Contrairement aux opérations commerciales qui concentrent leur séquestration dans les aquifères ou les réservoirs de pétrole, le projet CarbFix a été développé pour favoriser la technologie de CSC en injectant le CO₂ dans de la roche basaltique. Le basalte a été déterminé comme étant le type de roche le plus favorable à faire précipiter le CO₂ grâce à ses propriétés physicochimiques. (Matter et al. 2011)

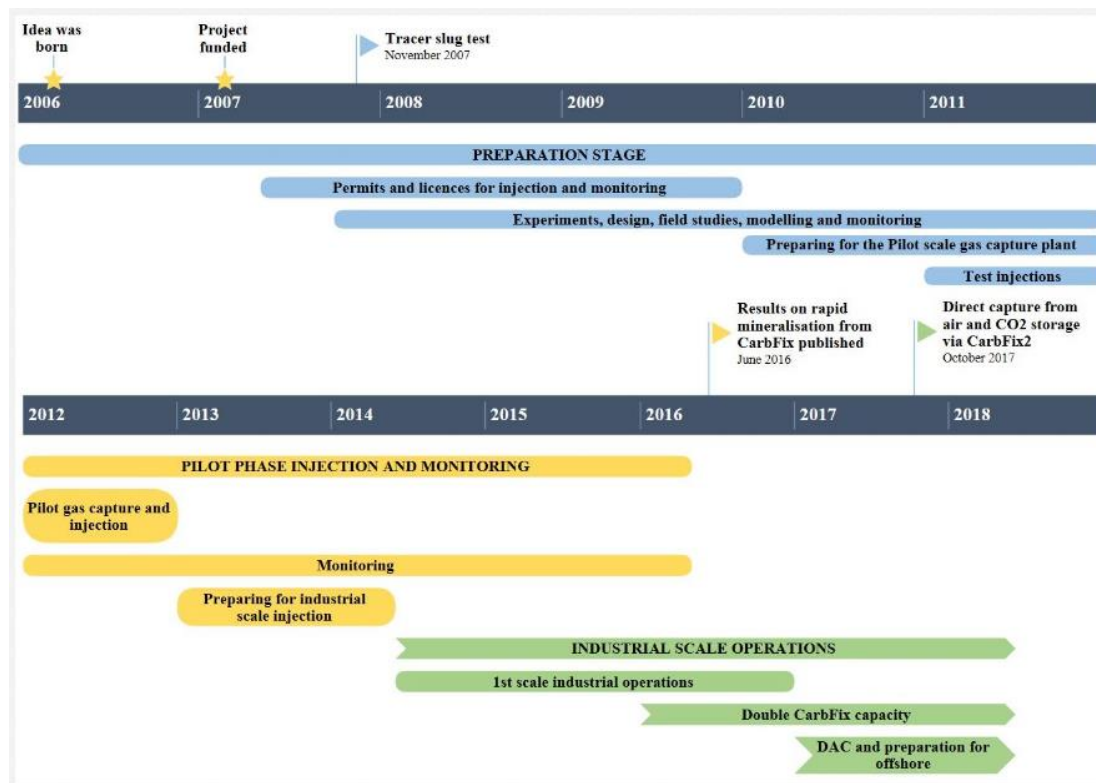


Figure 3.4 Échelle temporelle de l'évolution du projet CarbFix (CarbFix, 2019d)

L'idée de ce projet a débuté en 2006 en Islande, dont les principaux objectifs étaient d'optimiser la méthode de séquestration chimique et caractériser un premier site d'injection du CO₂. Cela a duré jusqu'en 2012, quand la phase pilote d'injection et de surveillance a commencé. Les premières injections des essais ont débuté en 2012 au site pilote du projet CarbFix situé à proximité de la centrale énergétique Hellisheidi. En

quelques mois, la phase pilote a démontré sa capacité rapide de minéralisation du CO₂ grâce à ses 175 tonnes de CO₂ pur dissoutes et injectées à une profondeur de 500 mètres et à une température de 35°C. (CarbFix, 2019d) Une étude faite sur ces essais pilotes a démontré que 95 % du CO₂ injecté dans le site de CarbFix a été minéralisé en carbonate, et ce, en une période de deux ans. Cette conclusion a permis de réfuter l'hypothèse commune exposant que la minéralisation du CO₂ en carbonate prend plusieurs centaines d'années. (Matter et al., 2016) Comme les injections des essais pilotes furent un succès, CarbFix a poursuivi ses injections à un niveau industriel en travaillant conjointement avec la centrale géothermale Hellisheidi, appartenant à Reykjavik Energy. (Strandmann, 2019; CarbFix, 2019c) En 2018, les injections de CO₂ ont été estimées à 10 000 tonnes par année. (CarbFix, 2019d)

Plus récemment, l'équipe de CarbFix tente de jumeler leur technologie d'injection du CO₂ sous la surface terrestre avec la technologie du DAC (*Direct Air Capture*). Depuis octobre 2018, la centrale géothermique Hellisheidi est équipée du DAC pour capturer le CO₂ de l'air ambiant, le dissoudre et l'injecter dans le sol pour minéralisation. La capacité de capture est d'environ 90 kg de CO₂ par jour et cette phase d'opération pilote a été prolongée d'un an. (CarbFix, 2019a) Cette collaboration entre ces deux technologies permettrait de séquestrer et de précipiter le CO₂ de façon permanente, en plus de créer des émissions de CO₂ négatives (retrait direct du CO₂ de l'air ambiant). Ce projet, nommé CarbFix2, a été créé afin de rendre la technologie de CarbFix viable économiquement et de la partager en Europe. Afin d'atteindre son but, l'équipe du projet de CarbFix2 a été divisée en six sections et chacune d'entre elles permet d'assurer une bonne cohésion entre les objectifs. (CarbFix, 2019a) La figure 3.5 présente le schéma ainsi que les étapes prévues au projet qui est en cours. Le WP-1 correspond à la gestion du projet CarbFix2 dans son ensemble incluant l'organisation des activités, la coordination du projet dans l'Union européenne, la gestion des aspects financiers, etc. Le projet CarbFix2 prévoit intégrer la technologie du DAC (*Direct Air Capture*) à sa technologie de CarbFix et aussi de diminuer les coûts associés à la chaîne de capture et séquestration du carbone (WP-2). Il projette de capturer et injecter le CO₂ impur et dissout dans des réservoirs souterrains (WP-3). De plus, il projette aussi de développer la technologie de CarbFix afin qu'elle puisse séquestrer et minéraliser le CO₂ en utilisant l'eau de mer et des injections dans la roche basaltique sous-marine (WP-4) (CarbFix, 2019a). Il n'y a cependant pas de données concernant le temps requis pour réaliser ces étapes. Il pourrait être envisageable de mettre un échancier afin d'établir une vue d'ensemble de ce projet.

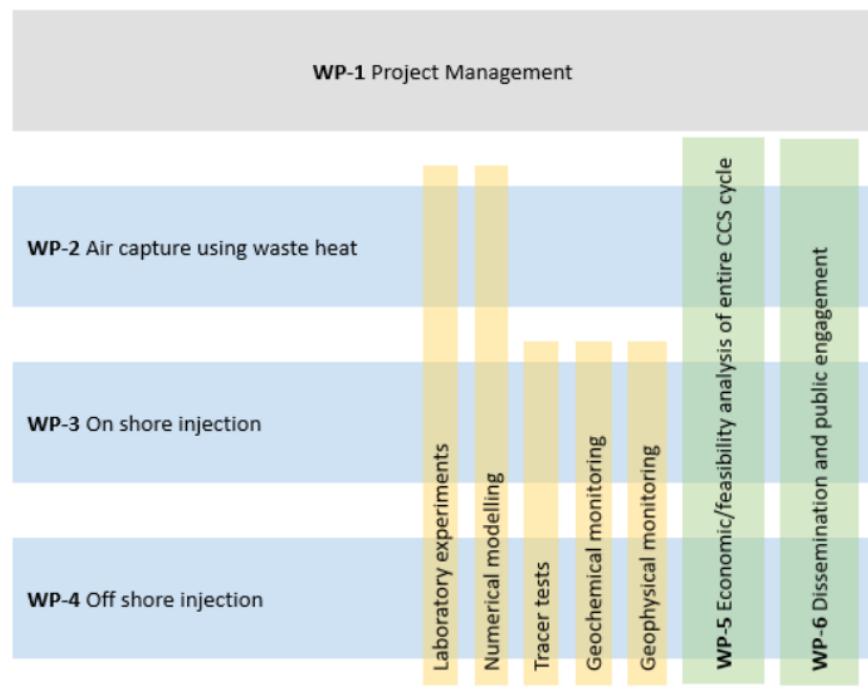


Figure 3.5 Schéma des six sections du projet CarbFix2 (CarbFix, 2019a)

Nécessitant de grandes sources d'eau et un type de roche ayant des propriétés physicochimiques particulières, l'Islande est entourée d'eau et possède un sol volcanique rempli de roche basaltique, ce qui en fait un lieu géographique idéal pour développer cette technologie. Toutefois, ce n'est pas toutes les régions du monde qui possèdent d'assez grandes sources d'eau pour dissoudre le CO₂ et le type de roche nécessaire pour précipiter le CO₂. Pourtant, l'équipe de CarbFix cherche actuellement à exporter leur méthode d'injection en Europe au travers du projet *Geothermal Emission Control* (GECO). Ils ont déterminé différents sites potentiels d'injections pouvant minéraliser le CO₂ : le basalte, le gneiss, les roches sédimentaires ou le calcaire. Le concept est de capturer les résidus gazeux provenant de différentes centrales énergétiques, de les dissoudre dans une solution aqueuse pour ensuite injecter la substance sous la surface rocheuse et permettre la minéralisation et fixation du gaz dissout. (CarbFix, 2019b) La liste ci-dessous présente certaines caractéristiques que possède la technologie CarbFix. Ces caractéristiques concernent le potentiel d'utilisation de la roche formée suite à la minéralisation, la capacité de capture et de séquestration, les avantages concernant la sécurité et la durabilité, le potentiel d'exportation du projet et les aspects logistiques. (CarbFix, 2019a; CarbFix2019e).

- Potentielle valorisation de la roche résultante de la séquestration.
- Concernant la capacité de capture et de séquestration : Injection d'environ 0,01 Mt de CO₂ par année.

- Au niveau de la durabilité et sécurité du projet :
 - o Précipitation du CO₂ sous forme de roche.
 - o Le CO₂ est séquestré de façon permanente et durable.
 - o Risque de fuite minime.
- Diffusion du projet à grande échelle à l'aide du projet GECO.
- Autres types de roches pouvant minéraliser : le basalte, le gneiss, les roches sédimentaires ou le calcaire.
- Combinaison possible avec d'autres technologies de capture du carbone comme le DAC (CarbFix2)
- Injections potentielles dans la roche sous-marine.

3.3 Carbon Engineering, Colombie-Britannique, Canada

La technologie du *Direct Air Capture* (DAC) correspond à un ensemble de technologies qui peuvent extraire le CO₂ de l'atmosphère. C'est principalement un ensemble de technologies qui est encore en phase pilote et qui a le potentiel de retirer le CO₂ directement de l'atmosphère. La faisabilité à grande échelle ainsi que sa commercialisation sont encore à démontrer, mais il est estimé que le potentiel de capture d'une installation à grande échelle pourrait s'élever à 1 Mt de CO₂ par année. Toutefois, les coûts sont relativement élevés pouvant aller de 94 à 232 dollars canadiens (\$ CA) par tonne de CO₂. (Keith et al., 2018) Au Canada, il existe une entreprise nommée Carbon Engineering (CE), qui fait l'étude de cette technologie depuis 2009. La technologie de CE, du nom de *Direct Air Capture*, est en utilisation depuis 2015 à Squamish, en Colombie-Britannique, dans le cadre d'un projet pilote. Son rendement est plus faible que les autres technologies, au niveau du taux de capture du carbone, et cela est causé par le fait que le projet est encore au stade pilote. Plus récemment, en mai 2019, la compagnie CE a annoncé le début des procédures de conception d'une installation à plus grande échelle pouvant capturer environ 500 kilotonnes de CO₂ par années. Cette installation serait potentiellement installée dans le bassin permien, au Texas, où le carbone capturé sera utilisé dans les procédés d'extraction de pétrole de la compagnie *Occidental*, entreprise participant au financement du DAC. (Carbon Engineering, 2019g)

Cette technologie est basée sur quatre systèmes opérationnels. (Carbon Engineering, 2019b)

1. Le contracteur d'air, au début du processus, permet de capturer l'air afin de capturer le CO₂ et de le convertir en carbonate.
2. Le réacteur à granules convertit les carbonates en granules de carbonate de calcium qui sont ensuite asséchées.
3. Le four de calcination est un récipient clos qui chauffe ces granules afin de les briser pour diviser le CO₂ gazeux d'une matière solide comme de l'oxyde de calcium qui se dépose au fond du four.
4. Le *slaker* conclut la boucle en hydratant l'oxyde de calcium pour être envoyé dans le réacteur de granules sous forme d'une solution de capture d'hydroxyde.

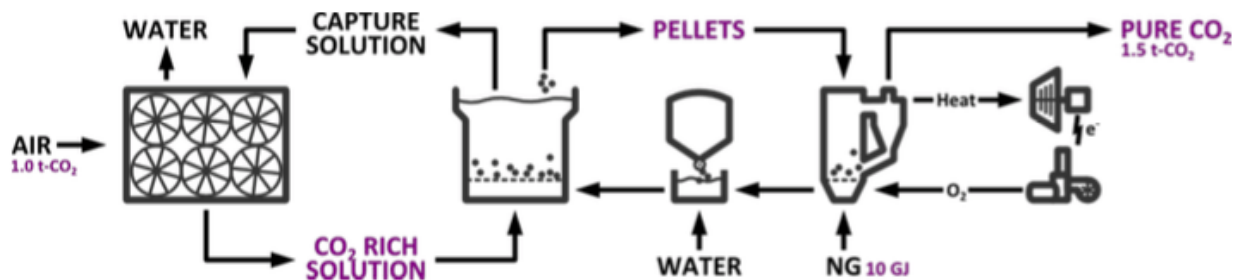


Figure 3.6 Système opérationnel de capture du CO₂ du DAC de Carbon Engineering (Carbon Engineering, 2019b)

Une fois ces quatre étapes passées, le CO₂ qui en ressort est purifié et prêt à une seconde utilisation. Les utilisations possibles suite à la capture du CO₂ par le DAC sont la récupération assistée du pétrole, la séquestration permanente, la production de matériel dont le métal ou de produits chimiques tels que du plastique ou des fertilisants. Il existe une autre application particulière du DAC de Carbon Engineering est c'est la création d'un carburant faible en carbone et utilisable dans les moteurs à combustion ou les infrastructures grâce à leur technologie d'AIR TO FUELS™. (Carbon Engineering, 2019a) Cette technologie, en phase pilote depuis 2017, consiste en la création d'un carburant à partir du CO₂ capturé par le DAC et de l'hydrogène généré par électrolyse de l'eau alimentée par des énergies vertes. Ces deux éléments réagissent ensemble pour produire un *syngas* puis des hydrocarbures. (Carbon Engineering, 2019b) Comme illustré à la figure 3.7, cette technologie, permettant d'utiliser le CO₂ pour créer un carburant faible en carbone (produisant moins d'émission de CO₂), propose des méthodes de capture et d'utilisation du carbone en continu (Natural Resources Defense Council, 2012). Le CO₂ présent dans l'atmosphère, émis par les activités humaines comme le transport, sont captés par la technologie du DAC afin d'être synthétisé en carburant.

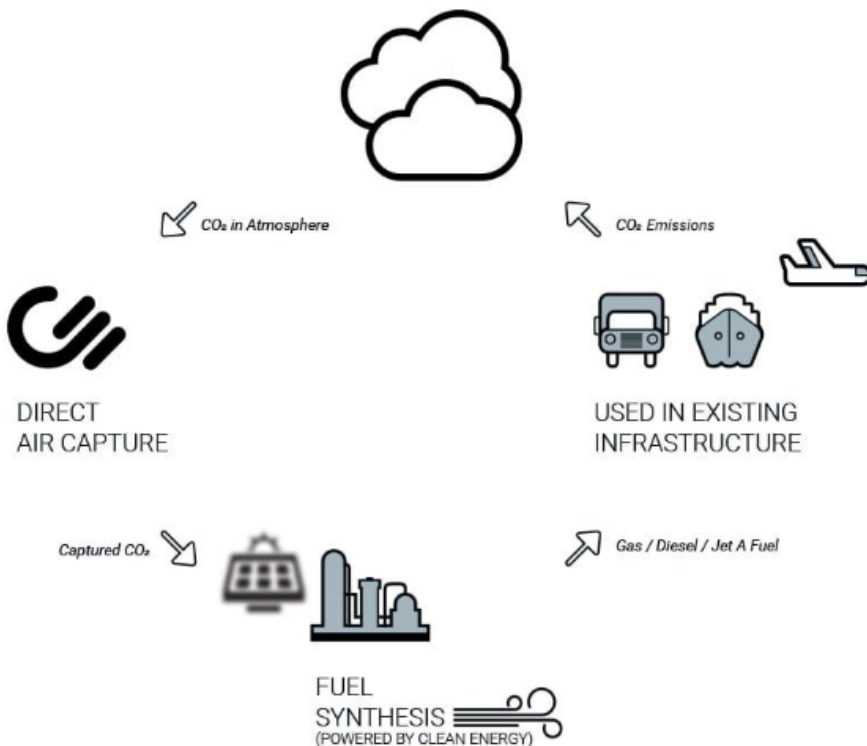


Figure 3.7 Schéma de la technologie AIR TO FUEL™ (Carbon Engineering, 2019a)

Détaillé ci-dessous, voici les principales caractéristiques du DAC jumelé avec la création du AIR TO FUEL™ (Carbon Engineering, 2019a; Carbon Engineering, 2019b)

- Production estimée à moins d'un dollar par litre (1\$/litre) une fois établi.
- Empreinte environnementale sur l'utilisation du sol et de la consommation d'eau 100x moindre que les biocarburants.
- Aucun sulfure ou particule en suspension faible. Diminue la pollution de l'air en plus des GES.
- Carburant dont l'intensité en carbone sur le cycle de vie est extrêmement faible ou neutre en carbone.
- Le carburant est compatible avec les infrastructures et moyens de transport actuels.
- Utilisation d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien.
- Possibilité d'être mélangé avec les combustibles fossiles traditionnels afin de réduire progressivement les émissions de GES.
- Les réglementations concernant les combustibles à faible teneur en carbone renforcent leur avantage concurrentiel et permettent la viabilité du marché.

La précédente liste présente les principales caractéristiques qu'offre la technologie découlant du DAC de Carbon Engineering : Air To Fuels™. Comme la technologie est encore au stade pilote, les caractéristiques au niveau du potentiel de réduction de même que les avantages financiers ne sont que des hypothèses. Le

groupe Carbon Engineering estime qu'une installation à grande échelle de la technologie du DAC pourrait avoir un potentiel de capture d'environ un million de tonnes de CO₂ par année à des coûts de traitement d'environ 130 à 199 dollars canadiens par tonne de CO₂. (Carbon Engineering, 2019b)

Considérant que le projet du DAC et du AIR TO FUELS™ sont encore des projets pilotes depuis 2015 et 2017, CE compile actuellement les données accumulées au cours des derniers tests afin de valider la viabilité du projet à l'échelle commerciale. Une fois ces deux technologies approuvées, des installations commerciales seront déployées autour de 2021. (Carbon Engineering, 2019f)

3.4 CO₂ Solutions, Québec, Canada

Au Québec, la compagnie CO₂ Solutions a développé une technologie permettant de capturer les émissions de CO₂ à la source. Cette technologie de capture est basée sur une enzyme nommée l'anhydrase carbonique (AC) qui est responsable du gaz carbonique lors de la respiration chez les êtres vivants. Cette molécule a été choisie spécifiquement pour sa capacité d'absorption de molécules de CO₂, estimée à environ un million par seconde. (CO₂ Solutions, 2018f)

Cette technologie a été développée en 1997 (CO₂ Solutions, 2018e), dans un contexte mondial où les nations du monde entier avaient une volonté de mettre en place des solutions pour combattre les changements climatiques. Lors de cette même année, de nombreux pays industrialisés ont signé le protocole de Kyoto, dont le Canada, pour qui le but était de réduire ses émissions de GES d'environ 6 % par rapport à 1990 (L'Encyclopédie canadienne, 2019). La création de CO₂ Solutions n'est pas liée avec la mise en place d'un protocole mondial de réduction d'émissions de GES, mais elle est une solution pouvant aider à atteindre les objectifs de réduction. Financé autant par le gouvernement fédéral, par le gouvernement provincial et des partenaires privés, CO₂ Solutions lance l'initiative Valorisation Carbone Québec (VCQ) en 2017 afin de développer de nouvelles technologies de capture et d'utilisation du CO₂. Cette initiative, à l'aide de ses partenaires, prévoit le déploiement d'installations commerciales de capture et utilisation du CO₂ auprès des industries émettrices de GES qui travaillent avec CO₂ Solutions dans le cadre de l'initiative Valorisation Carbone Québec. (CO₂ Solutions, 2018g) Il est donc possible de voir que cette technologie se décline en deux temps : soit la capture avec le procédé d'AC et la valorisation du CO₂ par réutilisation directe, par la vente du CO₂ capturé à des compagnies avoisinantes nécessitant du carbone dans leurs procédés ou par toutes sortes d'utilisations complémentaires présentées dans les prochains paragraphes.

La technologie de CO₂ Solutions, qui s'apparente à un poumon industriel, peut être adaptée pour la CUC ou la CSC. D'un premier côté, la réutilisation est favorisée par la purification du dioxyde carbone réalisée par la technologie de l'enzyme anhydrase carbonique. La réutilisation peut se faire directement ou avec conversion. La réutilisation directe est lorsque l'industrie émettrice nécessite du gaz carbonique pour ses procédés industriels. La technologie de CO₂ Solutions permet donc à ces compagnies d'être autonomes et de réutiliser le CO₂ qu'elles émettent elles-mêmes au lieu d'émettre du CO₂ dans l'environnement et d'en

acheter pour le fonctionnement de leurs procédés. En ayant leur propre installation de capture du CO₂, ces industries peuvent diminuer leurs émissions de GES, les coûts associés aux émissions et à la production, elles peuvent améliorer les procédés de récupération de CO₂ et diminuer leur dépendance à des fournisseurs externes en CO₂. (CO₂ Solutions, 2018c) D'un autre côté, la réutilisation du dioxyde de carbone avec conversion est choisie lorsque l'entreprise ou l'industrie qui émet les émissions de CO₂ n'a pas besoin de ce dioxyde de carbone dans ses procédés industriels. Elle peut donc décider de vendre le dioxyde de carbone capturé à une autre entreprise ou industrie à proximité qui pourrait en avoir besoin. Cela procure donc un avantage pour l'entreprise émettrice qui vend puisque ça lui permet de réduire son empreinte environnementale en plus d'avoir un revenu avec ses émissions. Ce type d'échange permet aussi à l'entreprise qui achète d'avoir une source fiable et économique en dioxyde de carbone. Dans ce type d'utilisation, le dioxyde de carbone est davantage valorisé puisqu'il est capturé au lieu d'être émis dans l'atmosphère et qu'il est utilisé dans d'autres procédés. Ce type de valorisation est une boucle qui permet aux entreprises de générer leur propre source d'alimentation en CO₂. (CO₂ Solutions, 2018c) Dans le cas où l'entreprise n'utilise pas de dioxyde de carbone dans ses procédés et qu'elle ne peut vendre à une entreprise à proximité, il est possible de capturer le CO₂ et de le séquestrer avec la technologie de CO₂ Solutions. Après la capture du CO₂ à l'aide de sa technologie, le gaz est stocké dans des formations salines souterraines de façon permanente. (CO₂ Solutions, 2018c) Au printemps 2019, le projet s'est développé en phase pilote dans une usine de pâte et papier de Saint-Félicien. Il comprend un système de capture du CO₂ d'environ 30 tonnes par jour. Étant une technologie qui valorise l'utilisation du CO₂, c'est la méthode de réutilisation commerciale qui est employée en transportant le carbone capturé à des serres avoisinantes (Serres Toundra) afin qu'il l'utilise dans leurs procédés. (CO₂ Solutions 2019b)

Diverses applications sont issues de la technologie de CO₂ Solutions dont le procédé principal est l'anhydrase carbonique. Parmi les plus connus qui sont proposés, mais pas encore mis en application par la compagnie, il est possible de retrouver la récupération assistée des hydrocarbures, et ce, principalement dans le contexte de la séquestration du carbone pour les sables bitumineux en Alberta (CO₂ Solutions, 2018i). Le carbone capturé par la technologie de CO₂ Solutions est aussi réutilisé dans les industries de pâtes et papiers, du traitement de l'eau, des cultures en serre ou de microalgues, de la carbonatation des boissons et de la production de combustibles liquides. (CO₂ Solutions, 2018h) Comme la technologie est encore en phase démonstrative avec la réutilisation commerciale comme valorisation (l'exemple des Serres Toundra), ces applications demeurent théoriques.

Cette technologie a plusieurs caractéristiques distinctives et c'est dans la liste suivante que sont exposées ces diverses caractéristiques. Ces dernières sont séparées en six sections : la rentabilité, la performance, la pratique, l'écologie, la durabilité et la logistique. (CO₂ Solutions, 2018b) Ce sont quelques-unes des principales caractéristiques de la technologie de capture enzymatique jumelée à l'initiative Valorisation Carbone Québec que la compagnie CO₂ Solutions met de l'avant :

- Au niveau de la rentabilité :
 - Coût d'exploitation (avant ou après implantation): 60% plus bas que les autres technologies conventionnelles de CSC.
 - Axé sur la valorisation, rentabilisation et réutilisation.
- Pour l'aspect concernant le côté écologique :
 - Dépollution de l'air par des technologies de haute efficacité.
 - Utilisation de solvants inoffensifs. Remplacement de l'utilisation de solvants chimiques.
 - Réduction de la consommation d'énergie (non-utilisation de solvant chimique).
 - Aucun déchet, émission d'aérosol ou contaminant toxique généré.
- Au niveau de la pratique :
 - Solution d'absorption stable
 - Gestion des opérations simple
 - Diminution des besoins de prétraitement des gaz
 - Aucun besoin d'un échangeur de chaleur
 - Capacité de fonctionnement à basse température. Aucune chaleur élevée requise.
- Concernant l'aspect performance :
 - Captation jusqu'à 90% des émissions de GES à la source.
 - Efficacité supérieure de récupération du CO₂.
 - Purification du CO₂ jusqu'à 99,95% ou plus.
- Au niveau de la durabilité de la technologie et du projet :
 - Aucun risque de dégradation par la chaleur.
 - Corrosité faible. Peu de problème de corrosion.
- Pour l'aspect logistique :
 - Solutions adaptables à tous types d'installations.
 - Multiplicité des sources d'approvisionnement.

Les informations émises précédemment mettent en lumière le fait que la technologie d'anhydrase carbonique de CO₂ Solutions, une fois implantée, aura un coût d'exploitation allant jusqu'à 60% plus bas que les autres technologies conventionnelles sur le marché de la capture du carbone. De plus, étant une technologie axée sur la valorisation et réutilisation du carbone capturé, cela procure un avantage pour les industries décidant de s'équiper de cette technologie dans le but de réduire les émissions de GES. En termes de performance, la technologie de l'anhydrase carbonique permet une captation pouvant aller jusqu'à 90% des émissions de GES à la source et peut offrir une purification du CO₂ allant jusqu'à 99,95% ou plus. Les autres avantages autant sur l'aspect écologique, durable ou logistique permettent aussi de faire la comparaison entre la technologie de CO₂ Solutions et les plus conventionnelles. Cette liste créée à partir des informations tirées du site officiel de CO₂ Solutions met les bases pour le chapitre quatre où la technologie d'anhydrase carbonique sera comparée à d'autres technologies de capture du carbone.

Considérant que ce projet est encore à petite échelle, il est à se demander si le projet serait viable à grande échelle. Étant jumelé avec l'initiative Valorisation Carbone Québec, il sera plus facile pour la technologie de CO₂ Solutions de se déployer et de valoriser le carbone capturé. En revanche, comme l'initiative est concentrée dans la province de Québec, du Canada, étendre la technologie d'anhydrase carbonique à grande échelle nécessiterait une initiative de valorisation du carbone capturé à grande échelle aussi. Cette hypothèse sera analysée au chapitre quatre.

3.5 Petra Nova, Texas, États-Unis

Excluant la séquestration dans les aquifères salins comme le fait le projet Sleipner CO₂ Storage en Norvège, d'autres industries utilisent la séquestration géologique à des fins de récupération du pétrole. C'est ce que fait le projet de capture du carbone de Petra Nova, au Texas, États-Unis. Ce projet, ayant débuté en 2017, est le seul projet de CSC à grande échelle aux États-Unis jusqu'à présent. Étant lié à la centrale énergétique au charbon W.A. Parish Generating Station au Texas, le projet de Petra Nova permet la capture du CO₂ émis par la centrale au charbon grâce à des procédés de capture postcombustion. Cette technologie permet de capturer près de 90% des émissions de la centrale au charbon, représentant environ 1,4 million de tonnes par année. (CSC Global Report, 2018) Une fois le CO₂ capturé par les procédés de postcombustion, le CO₂ est compressé et ensuite transporté par pipeline sur une distance d'environ 80 km, jusqu'au *West Ranch oil field*, où il sera utilisé à des fins de récupération assistée du pétrole. (National energy technology laboratory, 2019). La figure 3.7 illustre la capture du CO₂ provenant de la centrale W.A Parish jusqu'à son cheminement vers les installations d'extraction de pétrole *West Ranch*. Le CO₂ (en bleu) est ensuite séquestré dans le réservoir de pétrole pour favoriser l'extraction de celui-ci. Le CO₂ provenant des installations d'extraction est aussi récupéré afin d'augmenter le rendement d'extraction. (Shimokata, 2018)

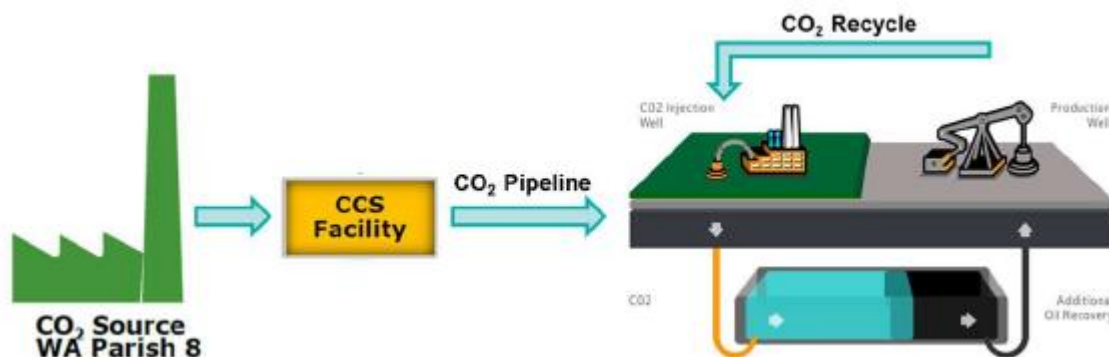


Figure 3.8 Schéma des installations du projet Petra Nova (Shimokata, 2018)

En 2015, soit deux ans avant le début des activités de Petra Nova, l'étude de cas de Jesse Jenkins, en collaboration avec le *Paulson Institute* et le *China Center for International Economic Exchanges*, a fait ressortir que le projet de Petra Nova a vu le jour dans un nouveau contexte réglementaire. En effet, au même moment, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis commençait à réguler les

émissions de CO₂ provenant des centrales énergétiques. L'étude de cas précise que : « *Post-combustion capture is one way for power plant owners to comply with these new rules, but without experience from large-scale projects, the technology will remain too expensive and risky to be a viable option* » (Jenkins, 2015). Cela pourrait expliquer la raison pour laquelle la centrale W.A Parish Generating Station s'est tournée vers les procédés de postcombustion dans son projet de capture du carbone Petra Nova. Actuellement, malgré le fait que l'étude de cas précise que ce type de technologie est trop coûteux et risqué pour être viable, le projet de Petra Nova accumule des revenus par sa vente du CO₂ aux compagnies pétrolières. Cela lui permet de rester commercialement viable. (McHugh, 2018)

La liste suivante expose certaines caractéristiques de l'utilisation de la RAP. Ces informations sont classées comme étant des caractéristiques provenant de documents étant accessibles à tous sur internet. L'auteure du présent essai est consciente que certaines de ces caractéristiques sont mitigées par le lieu de provenance et les auteurs les ayant rédigées. Voulant démontrer que certaines informations facilement accessibles peuvent être écrites de façon à favoriser un institut ou une technologie, ces informations ont tout de même été ajoutées à des fins d'analyse lors du prochain chapitre.

Listé ci-dessous se trouve quelques-unes des principales caractéristiques de l'utilisation de la RAP, plus particulièrement associée au projet de capture et séquestration du carbone Petra Nova. A (McHugh, 2018); B (National Energy Technology Laboratory, 2019) ; C (Global CCS Institute, 2018a) ; D (Shimokata, 2018) ; E (CSC Global Report, 2018)

- Au niveau du rendement économique :
 - o Viabilité économique du projet par la vente du CO₂ aux compagnies pétrolières. ^A
 - o Augmentation de la demande en charbon dans les pays en développement. La technologie de Petra Nova pourrait avoir l'opportunité d'être exportée sur le marché mondial. ^A
 - o Augmentation de la production de pétrole domestique, contribuant à l'économie américaine. ^B
- Concernant la capture et séquestration du carbone :
 - o 90% des émissions de la centrale au charbon. ^C
 - o 1,4 million de tonnes par année. ^C
- Au niveau de la longévité de la technologie et du projet Petra Nova :
 - o Une voie à suivre pour les centrales au charbon existantes afin de continuer à produire de l'énergie tout en respectant les objectifs de durabilité environnementale. ^B
- Concernant le côté environnemental :
 - o Recyclage du CO₂ provenant de l'extraction du pétrole au lieu de l'émettre dans l'atmosphère. ^D
 - o Capture du CO₂ provenant de la centrale au charbon W.A Parish pour réduire les émissions atmosphériques. ^E

4 ANALYSE COMPARATIVE DE CINQ TECHNOLOGIES DE CSC ET CUC

Ce quatrième chapitre se veut être une analyse comparative des cinq différentes technologies de capture de carbone déterminées au chapitre trois en fonction de critères établis dans la présente section et des avantages exposés dans le précédent chapitre. La comparaison entre les cinq technologies visera entre autres à démontrer celle ayant le plus grand potentiel de capture de CO₂ ainsi que la méthode la plus adéquate d'utilisation ou de séquestration afin de déterminer celle(s) permettant d'atteindre les réductions de l'accord de Paris. La comparaison n'évaluera pas que le taux de capture, mais elle sera basée sur une série de 13 critères permettant d'établir, sur trois différents volets du développement durable, si les technologies choisies répondent non seulement à l'objectif de réduction des GES de l'accord de Paris, mais également si elles représentent un atout possible dans l'adaptation aux changements climatiques. D'abord, des critères à évaluer seront sélectionnés pour chacune des technologies ainsi que leurs méthodes de capture. Ces critères permettront d'établir le pouvoir de réduction et de faisabilité de chaque technologie. Finalement, cette analyse permettra de comparer les technologies de capture sélectionnées et de déterminer celle(s) qui répond(ent) le mieux aux critères pour ainsi recommander et conseiller le(s) projet(s) et la(les) technologie(s) reliée(s) permettant d'atteindre le mieux les objectifs de l'accord de Paris et de soutenir les autres méthodes de réduction et d'adaptation aux changements climatiques.

4.1 Méthodologie de recherche

Tout d'abord, après avoir fait une revue de littérature des technologies existantes sous forme de projet à grande échelle ou de projets pilotes, deux sources d'information ont été retenues. L'Agence Internationale de l'Énergie propose, sur son site internet, une carte interactive de plusieurs projets internationaux à grande échelle ainsi que des informations supplémentaires et plus spécifiques sur chaque projet énuméré. (International Energy Agency, 2019) Cette carte et cette liste incluent des projets de capture, séquestration et utilisation du carbone. Les informations supplémentaires comprennent le secteur d'activité, le taux de capture, le type de capture, le transport et le type de séquestration. La seconde source d'information retenue pour le choix des technologies est les données du Global CCS Institute. Cette base de données comprend aussi une carte interactive d'infrastructures de capture et séquestration du carbone. (Global CCS Institute, 2018a) Les catégories d'infrastructures comprennent celles à grande échelle, des projets pilotes et de démonstration, des centres de tests, des installations d'utilisation du carbone et des initiatives gouvernementales ou organisationnelles. Cette base de données comporte des tableaux incluant des détails plus explicites pour chaque technologie ou projet. Ces détails incluent la catégorie d'installation, le statut, la date de début d'opération, le type d'industrie auquel l'installation de technologie de CSC est rattachée ainsi que la capacité de capture. Les deux bases de données des deux différentes sources ont été utilisées pour sélectionner les cinq technologies présentées au chapitre trois et dans l'analyse du présent chapitre. Le choix s'est basé sur les différents détails spécifiques qui se sont transformés en critères d'analyse dans le cadre de cet essai. Ainsi, afin de diversifier les technologies à analyser, le choix des technologies et projets s'est principalement basé sur le taux de capture, le type de capture et l'utilisation ou

séquestration du carbone. Les critères déterminés au cours de cette analyse seront présentés et justifiés dans la section 4.1, puis un tableau des résultats ainsi qu'une analyse suivront.

Avant de poursuivre, le tableau 4.1 résume les cinq projets à l'étude. Chaque projet est présenté dans la colonne de gauche puis est identifié s'il est un projet de capture et séquestration du carbone ou un projet de capture et utilisation du carbone. Cette visualisation facilite la compréhension de l'objectif de chaque projet qui est soit de séquestrer le CO₂ capturé ou de l'utiliser à diverses fins. La dernière colonne présente les codes pour l'analyse, permettant d'identifier plus facilement les projets dans la matrice d'analyse présentée au chapitre quatre.

Tableau 4.1 Résumé des cinq projets de CSC et CUC analysés ainsi que les codes pour l'analyse

Projets	Capture	Séquestration	Utilisation	Codes pour l'analyse
Sleipner CO ₂ Storage	√	√		T1
CarbFix	√		√	T2
Carbon Engineering	√	√	√	T3
CO ₂ Solution	√		√	T4
Petra Nova Carbon Capture	√		√	T5

4.2 Étapes de l'analyse

La première étape de l'analyse a été de relever les principales technologies de capture du carbone avec utilisation ou séquestration. Ces technologies sont rendues à divers niveaux de développement : projets à grande ou petite échelle, stade pilote ou commercial. Cinq projets comportant leur propre technologie de capture du carbone avec soit utilisation ou séquestration du carbone ont été choisis à des fins d'analyse comparative à critères multiples. Les recherches primaires, ayant pour but de déterminer les cinq technologies pour l'analyse, ont servi à récolter des informations principalement sur le volet technique, plus particulièrement, sur la date de création des technologies, le type de projet, le taux de capture, l'usage et le niveau d'avancement. Dans le cadre de cet essai, il était important d'observer des installations à échelle internationale afin de respecter l'objectif du travail qui est de proposer des approches technologiques parmi celles qui présentent le plus d'avantages au niveau du potentiel de réduction, de la séquestration ou valorisation considérant les objectifs de réduction de l'accord de Paris. Le choix de sélectionner des installations et technologies de différents pays a été déterminé, car les avancées technologiques et les règlements en termes d'environnement ne sont pas les mêmes partout au niveau mondial. Certains gouvernements peuvent mettre plus l'emphasis sur des technologies en environnement que d'autres et surtout, sur l'utilisation du carbone une fois capturé. Le type de capture a aussi été un élément de

présélection. La sélection de différents types de capture a été priorisée puisque c'est cette différence entre les cinq technologies et installations combinée aux critères d'analyse qui permettra d'aider à déterminer quelle technologie est à recommander. Dans le cadre de cet essai, chaque technologie choisie correspond à un type de capture différent, ce qui permet de comparer cinq différentes méthodes de capture du CO₂.

Ces informations ont permis de faire le tri parmi les multiples technologies ayant été découvertes, réduisant le nombre à cinq technologies. Afin de comparer des technologies d'origine et d'objectifs divers, les cinq technologies choisies sont :

- Séparation industrielle et chimique, puis séquestration en mer de Sleipner CO₂ Storage
- Capture du CO₂ dans l'eau ou capture directe de l'air (DAC) puis minéralisation sous forme de roche de CarbFix et CarbFix2.
- Capture directe de l'air (DAC) puis séquestration ou synthèse en carburant propre de Carbon Engineering.
- Capture enzymatique puis réutilisation ou séquestration en mer de CO₂ Solutions.
- Capture postcombustion, puis séquestration pour la récupération du pétrole de Petra Nova Carbon Capture

La seconde étape de l'analyse est la présentation de l'outil développé lors de l'analyse de cet essai. Les volets de comparaison économique et environnemental ont été inspirés de la boussole bernoise telle qu'expliquée dans le document de l'Office de la coordination environnementale et de l'énergie du canton de Berne (2008). Cette approche a été choisie puisqu'elle permet d'évaluer les technologies sur deux des trois aspects du développement durable. Comme les projets de technologies de CSC et CUC ont des effets sur au moins deux indicateurs du développement durable, il est utile de s'inspirer de la boussole bernoise pour évaluer les répercussions sur l'économie et l'environnement. Le volet technique a toutefois été ajouté à l'analyse afin de présenter et de comparer adéquatement les technologies de capture du carbone avec utilisation ou séquestration. Les critères d'analyse des différents volets ont été choisis afin de respecter deux des trois principes de base du développement durable. La matrice d'analyse présentée à la section 4.5 est inspirée des critères déterminés avec la boussole bernoise et créée par l'auteure même dans l'optique de déterminer la ou les technologies répondant le plus positivement aux critères de sélection.

La troisième étape de l'analyse est de sélectionner des critères spécifiques permettant de comparer les cinq technologies déterminées dans l'étape précédente et qui détaille les réductions possibles de GES. Les critères ont donc été sélectionnés dans cet objectif et répartis sur trois volets : le volet technique, économique et environnemental. Le choix des critères du volet technique est basé sur les informations répertoriées dans les bases de données de l'Agence Internationale de l'Énergie et du *Global CCS Institute*. Les critères du volet économique sont basés sur les informations recensées lors de la recherche d'informations secondaires. Le choix des critères vise à démontrer si les technologies et leurs projets respectifs peuvent être développés à long terme et durables économiquement. Les critères du volet environnemental sont basés sur l'aspect de la protection de l'environnement. Comme l'objectif principal de

ces technologies est de retirer le CO₂ de l'atmosphère et d'améliorer les conditions environnementales, le choix des critères s'est basé sur les principes de protection des écosystèmes et de retrait du carbone.

La présentation détaillée des critères sélectionnés pour l'analyse est située dans la section suivante et le tableau 4.2 synthétise la description de ces critères.

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude A : Global CCS Institute, 2018a

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
<i>Volet technique</i>					
Année de début d'opération ^A	1996	2012	2015	2015	2017
Pays de provenance ^A	Norvège	Islande	Canada	Canada	États-Unis
Type de projet ^A	Projet commercial	Projet pilote et de démonstration	Projet pilote et de démonstration	Projet pilote et de démonstration	Projet commercial
Taux de capture par année ^A	1 Mt	0,01 Mt	1 Mt (prévue)	0,011 Mt (30t / jour)	1,4 Mt
Type de capture ^A	Séparation industrielle	Capture du CO ₂ dans l'eau pour ensuite le séquestrer ou par capture directe de l'air (DAC) en projet pilote	Capture directe de l'air (DAC)	Capture postcombustion, enzyme l'anhydrase carbonique (AC)	Capture postcombustion
Usage ^A	Séquestration en mer, aquifère salin	Séquestration et minéralisation : roche basaltique	Séquestration permanente, récupération assistée du pétrole, synthèse en un carburant propre, production de matériel.	Réutilisation directe, réutilisation avec conversion, séquestration dans des aquifères salins	Utilisation pour la récupération assistée du pétrole
Rendement	Séquestration d'un volume correspondant à environ 1 million de tonnes de CO ₂ par année. (Solomon, 2017) En 2011, les quantités cumulatives injectées sont estimées à 12 Mt _{eq} CO ₂ . (ZeroCO2, s.d.)	Le rendement de capture de la centrale est de 12 000 tonnes de CO ₂ par année, ce qui équivaut à 33% (Carbfix, 2019b)	Projet pilote: Estimation du rendement pour un projet à grande échelle: 1 Mt de CO ₂ . (Global CCS Institute, 2018a) Estimation du projet DAC au Texas annoncé en mai 2019: 500 kt CO ₂ . (Carbon Engineering, 2019g)	Captation jusqu'à 90% des émissions de GES à la source et purification du CO ₂ jusqu'à 99,95% (CO ₂ Solutions, 2018b)	Capture de 90% des émissions de la centrale au charbon W. A. Parish. (Global CCS Institute, 2018b)

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
Niveau d'avancement	<p>Projet de stade commercial et grande échelle. En activité depuis 1996. Un des premiers projets de capture en mer. (Solomon, 2017)</p> <p>Capacité maximale de séquestration dans la formation Utsira est d'environ 42 000 Mt de CO₂. (Solomon, 2017)</p>	<p>Le projet a complété le premier stade des opérations industrielles et aussi réussi à doubler sa capacité initiale. Il est actuellement en développement pour combiner sa technologie d'injection avec le DAC. Création du CarbFix2. (CarbFix, 2019a)</p>	<p>Projet pilote depuis 2017. Début de la procédure de conception d'installations à plus grande échelle (Texas) en mai 2019. (Carbon Engineering, 2019g)</p>	<p>Projet encore au stade pilote. Il a récemment effectué une démonstration dans une usine de pâte et papier de Saint-Félicien, au Québec, dont les taux de capture se sont estimés à environ 30 tonnes de CO₂ par jour. (CO₂ Solutions, 2019)</p>	<p>Projet en stade commercial et à grande échelle depuis 2017.</p>
Volet économique					
Coûts des opérations	<p>Le coût total de la création du projet est estimé à environ 132,5 millions de dollars canadiens (\$ CA). (ZeroCO₂, n.d)</p> <p>Le coût des opérations d'environ 9,2 millions \$ CA/an. (Trop et Brown, 2005)</p> <p>Le coût des opérations est d'environ 12 \$ CA/tonne injectée. (Korsbakken et Aamaas, 2016)</p> <p>Aucune information disponible quant au coût par tonne capturée.</p>	<p>Le coût total du projet est estimé à environ 33 millions \$ CA. (Aradóttir, 2017)</p> <p>Le coût des opérations de capture est estimé entre 40 et 65 \$ CA/tonne capturée. (Utonih et León R., s.d.)</p> <p>Le coût des opérations d'injection estimé à environ 2500 \$ CA/tonne de CO₂ injectée. (Aradóttir, 2017)</p>	<p>En 2018, coût pouvant aller de 94 à 232 \$ CA par tonne de CO₂ capturée. (Keith et al., 2018)</p> <p>Vise à réduire le coût de capture du CO₂ à moins de 100 \$ CA/tonne. (Carbon Engineering, 2019g)</p>	<p>Le coût total du projet de capture du CO₂ complété et de son équipement est estimé à environ 8,5 millions \$ CA. (Ressources naturelles Canada, 2018b)</p> <p>Le coût des opérations est d'environ 25\$ CA/tonne de CO₂ capturée. (Ressources naturelles Canada, 2018b)</p>	<p>Le coût total du projet est d'environ 1,3 milliard \$ CA. (Shimokata, 2018)</p> <p>Le coût des opérations est d'environ 80 \$ CA/tonne capturée. (Schlissel et Wamsted, 2018; Board, 2018)</p>

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
Mesures incitatives économiques	Vers la fin des années 90, le gouvernement de la Norvège avait mis en place une nouvelle taxe concernant les émissions de CO ₂ en mer. La compagnie Statoil a décidé de séquestrer ses émissions de CO ₂ dans un aquifère salin. (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010)	Volonté du partage de cette technologie au sein de l'Union européenne. Le projet et ses partenaires ont reçu un montant d'environ 23,8 millions \$ CA pour leur programme de recherche et d'innovation. (CarbFix, 2019c)	<p>Investissement de 25 millions \$ CA de la part du gouvernement du Canada pour des énergies propres pouvant créer un hydrocarbure à partir du carbone dans l'air. (Carbon Engineering, 2019e)</p> <p>Investissement de 68 millions \$ CA en mars 2019 par une compagnie privée, permettant de rendre le projet commercial prochainement et de réduire les coûts de capture du CO₂ à moins de 100\$ CA /tonne. (Carbon Engineering, 2019d)</p> <p>Réception de nombreux investissement provenant de projets publics ou d'investisseurs privés comme Bill Gates. (Chalmin, 2019)</p>	Volonté des industries à émettre moins de CO ₂ . Combiné avec le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES, cette méthode de capture et d'utilisation du CO ₂ entre industries permet de réduire les coûts associés aux émissions de GES.	Augmentation de la production de pétrole domestique, contribuant à l'économie américaine. (National Energy Technology Laboratory, 2019)

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBIFIX ET CARBIFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
Viabilité et faisabilité économique et technique à long terme	<p>La faisabilité dépend de la présence de réservoirs sous-marins ou aquifères salins répondant aux exigences de sélection pour accueillir et séquestrer du CO₂.</p> <p>Les exigences comprennent:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perméabilité adéquate - Minéralogie adéquate - Profondeur et épaisseur adéquate - Pression adéquate - Température adéquate - Porosité adéquate <p>(Solomon, 2017)</p> <p>La séquestration sous-marine possède un des puits de séquestration (océans) les plus grands et celui-ci est estimé à 40 000 Gt de CO₂. (Solomon, 2017)</p>	<p>Projet GECO (projet international dont CarbFix fait partie pour réduire les émissions de carbone en Europe). Il augmente l'acceptabilité sociale des injections de CO₂ de CarbFix et appliquera cette méthode à quatre réservoirs géothermiques: en Islande, Italie, Turquie et Allemagne. La technologie de CarbFix peut être appliquée à n'importe quelle source de CO₂ tant qu'elle soit située près d'une formation de basalte et d'une source d'eau. (CarbFix, 2019c)</p> <p>Forte viabilité à long terme de la méthode de capture de CarbFix. Sa réussite a permis la création du GECO qui a multiplié la méthode de CarbFix à grande échelle. (CarbFix, 2019c)</p>	<p>La faisabilité a été démontrée lors du projet pilote à Squamish, Canada. Le financement est l'ingrédient manquant afin de développer le projet à plus grande échelle. Mai 2019, lancement de la conception des plans d'installations de DAC au Texas, à proximité de la compagnie d'extraction de pétrole <i>Occidental</i>. (Carbon Engineering, 2019g)</p> <p>La technologie du DAC capture le carbone directement de l'atmosphère. Sa viabilité à long terme est assurée si la technologie est jumelée avec une industrie émettrice.</p>	<p>Solutions adaptables à tous types d'installations. Multiplicité des sources d'approvisionnement.</p> <p>La viabilité du projet est basée sur les industries émettrices de CO₂. Elle est aussi basée sur la volonté des gouvernements à réduire leurs émissions de CO₂.</p>	<p>Augmentation de la demande en charbon dans les pays en développement. Nécessite un jumelage avec une centrale au charbon. Voie à suivre pour les centrales au charbon existantes voulant continuer à produire de l'énergie tout en respectant les objectifs de durabilité environnementale. (McHugh, 2018)</p> <p>Viabilité économique à long terme du projet par la vente du CO₂ aux compagnies pétrolières pour la RAP. (McHugh, 2018)</p>

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
<i>Volet environnemental</i>					
Risque de fuite de CO₂	<p>Risque de fuite minime grâce à la séquestration dans les aquifères salins à minimum 1000 mètres de profondeur. (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010)</p> <p>Le risque de fuite reste quand même présent, quoiqu'il soit minime à cause des potentiels séismes et fissures.</p>	Risque de fuite minime à cause de la minéralisation du CO ₂ liquide.	Le risque de fuite de CO ₂ dépend de l'utilisation qui en est faite. Dans le cas de l'utilisation de la RAP, les risques sont les mêmes que pour le projet Petra Nova. Pour le <i>AIR TO FUEL™</i> , le risque de fuite est faible puisque le CO ₂ est transformé en hydrocarbure dont la chaîne de carbone est complète (pas d'émission de CO ₂) (Carbon Engineering, 2019a)	Non déterminé	Risque de fuite de CO ₂ lors de l'utilisation pour la RAP et du retrait du pétrole avec la l'enfouissement du CO ₂ . Le niveau de risque des fuites n'est pas clairement établi.

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
Empreinte Environnementale	En cas de fuite causée par des fractures, failles ou puits, la contamination et le relâchement de CO ₂ peuvent affecter l'eau potable, les écosystèmes en surface et se répandre dans l'atmosphère. (Bruant et al., 2002)	<p>L'eau utilisée n'est pas contaminée et peut être réutilisée après que le CO₂ ait été retiré par le carbonate de la formation géologique. (CarbFix, 2019b)</p> <p>Dans le cas du projet en Islande, l'eau est potable après le retrait du CO₂. (CarbFix, 2019b)</p> <p>La demande en énergie peut varier entre 2,16 et 4,32 gigajoules par tonne de CO₂ (GJ/t CO₂). Peut occasionner une augmentation des coûts d'exploitation (Wang et al., 2017)</p>	<p>Aucun impact sur les nutriments des sols.</p> <p>Nécessite une grande source d'énergie pour la réaction chimique du DAC, le minimum théorique s'estimait à 1,8 GJ/t CO₂ en 2015. (Smith et al. 2015)</p> <p>Faible empreinte directe sur les sols, car le DAC peut être déployé sur des terrains peu bioproductifs. L'empreinte varie si la source d'énergie est l'air ou le soleil, car il nécessiterait des installations supplémentaires et un terrain particulier. (Smith et al. 2015)</p>	Dépollution de l'air par des technologies de haute efficacité. Aucun déchet, aérosol ou contaminant toxique n'est généré. (CO ₂ Solutions, 2018e)	<p>Risque de fuite et de contamination des sols. 10% non capturé est relâché dans l'atmosphère.</p> <p>Recyclage du CO₂ provenant de l'extraction du pétrole à la place de l'émettre dans l'atmosphère. (Shimokata, 2018)</p>

Tableau 4.2 Synthèse des principales caractéristiques pour chaque technologie à l'étude (suite)

PROJETS	SLEIPNER CO ₂ STORAGE	CARBFIX ET CARBFIX2	CARBON ENGINEERING	CO ₂ SOLUTIONS	PETRA NOVA CARBON CAPTURE
Atténuation du CO₂ atmosphérique	Capture et séquestration d'environ un million de tonnes de CO ₂ annuellement. (Solomon, 2017)	Capture d'environ 33% des émissions de carbone de la centrale Hellisheidi. (CarbFix, 2019e)	Estimation d'atténuation de CO ₂ atmosphérique pour un projet à grande échelle: 1 Mt de CO ₂ . Estimation du projet à grande échelle DAC au Texas annoncé en mai 2019 : 500 kt CO ₂ . (Carbon Engineering, 2019g)	Captation jusqu'à 90% des émissions de GES à la source. (CO ₂ Solutions, 2018e)	Capture d'environ 90% des émissions de la centrale au charbon W. A. Parish. (Global CCS Institute, 2018b)
Mesures d'assurance de la permanence du CO₂ séquestré	Contrôle de conformité pour s'assurer du comportement du CO ₂ dans le réservoir. Contrôle du confinement pour s'assurer que le CO ₂ reste dans le réservoir de stockage. Contrôle des imprévus par l'évaluation de mesure d'urgence en cas de fuite. Contrôle de surveillance par télédétection et surveillance sismique. (Furre et al., 2017)	CO ₂ séquestré de façon durable et permanente en calcite et ce, en moins de deux ans, grâce à un stockage immédiat par minéralisation. (Matter et al. 2016) Façon d'utiliser le CO ₂ afin de créer de la roche carbonatée.	Cela dépend de l'utilisation qui en est faite après la capture directe. Utilisation de la RAP : permanence relative au réservoir. Risque de fuite possible, mais de nombreuses techniques de surveillance existe. Utilisations autres : permanence plus élevée si le risque de fuite est faible. Exemple : création d'un combustible, croissance d'algue pour du biocarburant, utilisation dans divers matériaux, utilisation pour création de roches carbonatées par séquestration par carbonatation minérale.	Utilisation directe ou indirecte du CO ₂ capturé dans les activités industrielles des industries voisines. (CO ₂ Solutions, 2018c) Vente du CO ₂ pour utilisation. La permanence de la séquestration n'a donc pas d'effet.	Techniques de surveillance par télédétection ou surveillance sismique. (Shimokata, 2018)

La quatrième étape de l'analyse est la pondération des critères et des résultats. Chaque critère a été individuellement pondéré selon l'objectif de l'analyse, de l'essai et du principe de retrait de CO₂ de l'atmosphère. Ainsi la pondération des critères est basée sur un pourcentage de 100 et séparée pour les trois volets de la façon suivante :

- 50% pour le volet technique;
- 25% pour le volet économique;
- 25% pour le volet environnemental.

Le pourcentage de pondération des critères est plus élevé pour le volet technique principalement à cause du plus grand nombre de critères pour ce volet. De plus, considérant le principe de retrait du CO₂ de l'atmosphère, ce volet comprend quatre critères ayant un pourcentage de pondération de 10%. Concernant les autres volets, la pondération de 25% a été répartie entre trois et quatre critères. Pour le volet économique, les critères ont tous une pondération similaire puisqu'ils permettent d'analyser l'aspect du développement de projets internationaux et du partage de connaissances technologiques sur la capture et séquestration du carbone. Finalement, le critère d'atténuation du CO₂ du volet environnemental obtient une pondération supérieure aux trois autres critères de ce volet puisqu'il aide à répondre au principe de retrait du carbone, un des objectifs des technologies de CSC.

Chaque technologie se voit octroyer un résultat basé sur la pondération du tableau 4.3. Sur une échelle allant de -3 à 3, chaque critère est évalué, pour chaque technologie, s'il est favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement, c'est-à-dire quant au développement à long terme. Les objectifs de développement sont, d'une partie, les critères de l'analyse :

- 1- Avoir un type de projet pouvant être exploité à grande échelle;
- 2- Avoir un taux de capture suffisamment élevé pour le niveau d'avancement de la technologie;
- 3- Avoir une séquestration ou utilisation adéquate, permanente et écologique;
- 4- Avoir un rendement de capture du carbone suffisamment élevé;
- 5- Avoir un niveau d'avancement technologique relatif à l'année de début d'opération;
- 6- Avoir un coût d'exploitation du projet abordable et permettant la viabilité de la technologie à long terme;
- 7- Avoir la présence d'une certaine volonté économique du gouvernement et des entreprises privées à investir dans les projets de capture du carbone ou faire valoir une volonté de changement vers les technologies vertes;
- 8- Avoir une viabilité et faisabilité de la technologie et de son projet à long terme;
- 9- Avoir une viabilité à long terme de la technologie de capture et de son système de séquestration/utilisation du carbone;
- 10- Avoir un risque de fuite de CO₂ faible et contrôlé afin d'éviter une propagation du carbone capturé et séquestré dans l'atmosphère

- 11- Avoir une faible empreinte environnementale, afin de ne pas nuire aux écosystèmes en émettant des déchets environnementaux (autres GES, rejets chimiques, fuites, etc.) ou en surutilisant les ressources naturelles;
- 12- Avoir une forte atténuation du CO₂ atmosphérique;
- 13- Avoir une permanence du CO₂ séquestrée sur une période minimale d'un siècle.

Les notes maximales possibles sont 3 et -3. Si un critère se voit octroyer la note de 3, cela signifie que le critère a un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Si un critère se voit octroyer la note de 0, cela représente le fait qu'il n'a aucun effet sur l'atteinte des objectifs de développement. Puis, si un critère se voit octroyer la note de -3, cela signifie qu'il a un effet est très défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Les notes sont basées sur les informations disponibles actuellement sur chaque technologie individuelle.

Tableau 4.3 Pondérations associées aux critères pour l'analyse multicritère

3	Effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
2	Effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
1	Effet légèrement favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
0	Aucun effet sur l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
-1	Effet légèrement défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
-2	Effet défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.
-3	Effet est très défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement et de réduction de GES.

4.3 Présentation et justification des critères sélectionnés

La présente section est une présentation des 13 critères sélectionnés pour les trois volets. Les critères seront établis par volet et suivra une description individuelle. À la fin de la section, un tableau des 13 critères séparés par volet avec une courte description synthétisera cette section.

4.3.1 Les critères du volet technique

Les six critères sélectionnés pour l'analyse du volet technique permettant de déterminer une technologie répondant le plus à l'objectif du présent essai sont :

- 1- L'année de début des opérations (incluant phase pilote);
- 2- Type de projet;
- 3- Le taux de capture par année;
- 4- L'usage;
- 5- Le rendement;
- 6- Le niveau d'avancement.

Le premier critère de sélection est l'année de début des opérations des projets de CSC. Ce critère a été sélectionné, car il permet de déterminer le moment où le projet a été mis en opération. Dans le cadre de cet essai, ce critère permet de comparer les cinq installations de capture du carbone selon leurs années de début d'opération. Ce critère d'évaluation permet aussi de comparer l'ancienneté des technologies de capture et d'analyser les types de capture et l'utilisation du CO₂ par rapport à l'année de création de la technologie ou de l'installation. De plus, il permet aussi de déterminer, le cas échéant, si des ajustements au niveau du rendement ou de la capacité de capture sont nécessaires pour rivaliser avec les technologies plus récentes.

Le deuxième critère est le type de projet. Celui-ci permet d'identifier le type de projet auquel est rattachée la technologie en question. Inspiré de la base de données du *Global CCS Institute*, les types de projets ont été déterminés parmi les choix suivants : installation à grande échelle commerciale, projet en phase pilote et/ou de démonstration, centre de test ou installations d'utilisation du CO₂ (Global CCS Institute, 2018a). Considérer le type de projet comme critère permet de différencier les technologies par rapport à leur développement et d'expliquer les résultats (plus faibles à plus forts) en fonction de critères spécifiques. Lors de l'analyse, ce critère impactera sur l'efficacité des technologies à capturer et séquestrer ou utiliser le carbone, et permettra d'expliquer les différences possibles entre ces technologies au niveau des autres critères d'analyse.

Le troisième critère pris en compte dans l'analyse est le taux de capture par an. Ce critère est l'un des plus importants puisqu'il permet de comparer les capacités de capture des différentes technologies et il ajoute un élément dans la détermination de la technologie ayant le meilleur potentiel de réduction du CO₂. Afin de prendre en considération la différence entre les technologies à l'étude qui sont commerciales et démonstratives, le niveau d'avancement ainsi que le potentiel de capture futur seront pris en considération lors de la pondération.

Le quatrième critère est l'usage une fois le CO₂ capturé, soit l'utilisation ou la séquestration du carbone. Ce critère détermine l'utilisation que font les installations du CO₂ une fois capturées par leurs technologies respectives. Encore une fois, ce critère devait représenter différentes méthodes d'utilisation ou de séquestration afin d'analyser le plus de possibilités possible lors de cet essai.

Le cinquième critère de ce volet technique est le rendement. Ce critère permet de déterminer la productivité des technologies de capture avec séquestration ou utilisation du carbone en termes de taux de capture et taux de séquestration ou d'utilisation.

Le dernier critère du volet technique est le niveau d'avancement. Par ce critère, il est entendu de statuer le niveau d'avancement concernant le volet technologique et économique des projets et de leur technologie. Ce sixième et dernier critère du volet technique est similaire au critère deux (le type de projet) et permet aussi d'expliquer les différences entre les technologies par rapport aux autres critères.

4.3.2 Les critères du volet économique

La sélection de critères se poursuit avec le volet économique. Ce second volet a été choisi puisqu'il permet d'analyser le côté financier des projets et de leurs technologies. Ce volet comprend aussi trois critères :

- 1- Coût d'exploitation;
- 2- Mesures incitatives économiques;
- 3- Viabilité et faisabilité à long terme;

Le premier critère est le coût d'exploitation. L'objectif de ce critère est d'identifier les coûts des procédés par tonne de CO₂. L'analyse de ce critère combiné avec les autres permettra de déterminer la ou les technologies ayant un coût d'exploitation relativement faible pour le taux de capture et le rendement associés.

Le second critère est les mesures incitatives économiques. Ce critère estime le niveau de mesures incitatives économiques associé à chaque technologie. Ces mesures incitatives peuvent provenir d'industries ou de gouvernements voulant réduire leurs émissions de GES. Les mesures incitatives peuvent comprendre des bourses et des investissements financiers privés ou publics, mais aussi des mesures incitatives économiques gouvernementales en faveur de la réduction de GES par des taxes ou par des réglementations.

Le troisième critère de ce volet est la viabilité et faisabilité du projet à long terme. Comme l'objectif de l'essai est principalement de déterminer la ou les technologie(s) ayant le plus d'avantages pour atteindre les objectifs de réduction de l'accord de Paris, ce critère permet d'évaluer si la technologie peut être encore viable si projetée dans quelques années. Il permet d'évaluer si certaines technologies vont devoir cesser leurs activités par manque de ressources. Les technologies ayant actuellement un niveau d'avancement plus faible que les autres peuvent avoir la capacité de devenir plus importante d'ici la prochaine décennie. Une technologie durable économiquement et écologiquement à long terme signifie que son coût environnemental n'est pas nuisible aux écosystèmes et que les programmes financiers du projet permettent de continuer à mettre en œuvre la technologie de capture du carbone.

4.3.3 Les critères du volet environnemental

Puis, le troisième volet est celui concernant l'environnement, incluant les bienfaits, mais aussi les effets pouvant être négatifs sur l'environnement des technologies de capture, utilisation et séquestration du carbone. Les critères de ce volet comprennent :

- 1- Le risque de fuite de CO₂;
- 2- L'empreinte environnementale;
- 3- L'atténuation des émissions de CO₂;
- 4- Mesures d'assurance de la permanence du CO₂ séquestré.

Le premier critère du volet environnemental est lié aux fuites de CO₂. Ce critère a pour objectifs d'évaluer le potentiel de fuite de CO₂ suite à la séquestration ou tout autre usage du carbone une fois capturé par l'un des cinq types de capture provenant des cinq technologies à l'étude.

Le second critère est celui de l'empreinte environnementale. Ce critère détermine aussi si les technologies présentent des empreintes environnementales qui peuvent être minimisées lors de leurs opérations. Il évalue aussi si les technologies à l'étude émettent des déchets pouvant être nuisibles à l'environnement lors de leurs opérations de capture ou de séquestration/utilisation du carbone. Le rejet de déchets dans l'environnement est un élément évalué dans la présente analyse, car une technologie favorisant le retrait du CO₂ de l'atmosphère ne devrait pas rejeter d'autres éléments polluants par la suite. De plus, l'utilisation de ressources naturelles à des fins d'opération et de fonctionnement est aussi incluse dans ce critère, que l'utilisation soit excessive ou nulle.

Le troisième critère est l'atténuation des émissions de CO₂. Comme ce critère est l'un des principaux objectifs des technologies de capture du carbone, il permet d'évaluer le rendement des technologies en termes de retrait du CO₂ de l'atmosphère. Ce critère peut être combiné avec celui du rendement et du taux de capture afin de déterminer si les niveaux d'atténuation du CO₂ sont relatifs au type de projet et au niveau d'avancement. Il est important de prendre en considération ces deux derniers critères, car une technologie de type pilote ne capturera pas autant de CO₂ qu'une technologie de type commercial à grande échelle.

Le quatrième et dernier critère du volet environnemental est celui de la permanence du CO₂ séquestré. Il vise à estimer le niveau de permanence de la séquestration du CO₂ par les technologies choisies. Lors de l'utilisation, mais plus particulièrement lors de la séquestration, le CO₂ se doit d'être séquestré ou utilisé de façon permanente afin que le carbone ne soit pas réémis de façon volontaire ou accidentelle (fuite). Ainsi, la permanence de séquestration du CO₂ est un critère important à évaluer, car les technologies souhaitant être partagées à l'échelle mondiale doivent comporter des assurances de permanence du carbone séquestré. Le risque de fuite peut donc être diminué si le niveau de permanence est élevé.

Les différents critères classés par volet ainsi que leurs objectifs sont synthétisés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Synthèse de la description des critères d'analyse

<i>Volet technique</i>	
Année de début d'opération	Comparer les cinq technologies de capture du carbone entre elles selon leur année de début d'opération.
Type de projet	Identifier le type de projet auxquels les technologies sont rattachées : commercial, pilote ou démonstratif.
Taux de capture par année	Comparer les capacités de capture annuelles des différentes technologies.
Usage	Déterminer l'utilisation que font les installations du CO ₂ une fois capturé par leurs méthodes de capture respectives.
Rendement	Déterminer le rendement des technologies annuellement en termes de capture de carbone.
Niveau d'avancement	Statuer le niveau d'avancement technologique et économique des projets et de leur technologie.
<i>Volet économique</i>	
Coût d'exploitation	Identifier les coûts des procédés par tonne de CO ₂
Mesures incitatives économiques	Estimer le niveau des mesures incitatives économiques des industries ou des gouvernements à investir dans ces types de technologies.
Viabilité et faisabilité à long terme	Estimer si le projet est faisable économiquement et écologiquement à long terme
<i>Volet environnemental</i>	
Risque de fuite de CO₂	Évaluer le potentiel de fuite de CO ₂ suite à la séquestration ou autre usage du CO ₂ , une fois capturé par l'un des cinq types de capture provenant des cinq technologies à l'étude.
Empreinte environnementale	Déterminer si les technologies présentent des empreintes environnementales lors de leurs opérations.
Atténuation du CO₂ atmosphérique	Évaluer le rendement des technologies en termes de retrait du CO ₂ de l'atmosphère.
Permanence du CO₂ séquestré	Estimer le niveau de permanence de la séquestration du CO ₂ par les technologies choisies.

4.4 Contraintes et limites de l'analyse

La sélection des technologies à l'étude a subi plusieurs contraintes. En effet, à la suite de plusieurs recherches documentaires, nombreuses sont les technologies de capture et séquestration du carbone qui en sont ressorties. Par contre, plusieurs d'entre elles étaient classées comme étant des projets pilotes ou abandonnées. Cela a donc restreint le choix de certaines technologies pour l'analyse. De plus, afin de couvrir différents types de projets à la base des technologies de capture, le choix de cinq différentes technologies et de méthodes de capture fut décidé. Pour ce faire, la sélection des technologies fut beaucoup plus restreinte. Puis, comme l'objectif est de couvrir les technologies de capture à l'échelle mondiale, la sélection devait être faite sur le plan international. D'autres technologies de capture existent dans les mêmes pays que celles sélectionnées, mais elles n'ont pas été prises en compte dans l'analyse. Cependant, afin de varier les limites de l'analyse comme le niveau d'avancement et le taux de capture, certaines technologies ont été mises de côté, mais pourraient faire partie d'analyses futures et plus profondes sur le sujet.

Concernant la sélection des critères, nombreux sont ceux qui auraient pu être intégrés dans l'outil d'analyse, mais qui n'ont pas été retenus. Leur retrait est basé sur le manque d'information et validité des auteurs ainsi qu'une plus faible importance pour l'analyse et l'objectif de l'essai.

Au niveau de l'outil utilisé, il présente aussi certaines contraintes et limites à l'analyse des technologies et résultats. Certains volets auraient pu être ajoutés tels que le volet social et de la gouvernance, afin de bien compléter l'outil de la boussole bernoise du développement durable. Cependant, les critères du volet social étaient souvent sans réponse puisque plusieurs des technologies de capture sont encore au stade expérimental. Il devenait donc difficile d'obtenir des informations concernant l'aspect social du projet. De plus, comme ces types de technologie (la CSC et CUC) sont encore un sujet très récent et encore peu développé, le volet social a donc été remplacé par le volet technique, qui présentait des critères plus adaptés au contexte et à l'objectif de cet essai.

4.5 Présentation des résultats globaux

L'analyse multicritère effectuée dans le cadre de cet essai a permis de comparer cinq parmi une multitude de technologies de CSC et CUC. L'analyse multicritère est basée sur différentes caractéristiques répertoriées pour chacune des technologies pour les volets technique, économique et environnemental. Les résultats de la matrice d'analyse (tableau 4.5) ont démontré que les technologies du DAC et de CarbFix ont le mieux répondu aux critères d'analyse permettant ou non l'atteinte d'objectifs de développement établis par l'auteure au chapitre quatre. Ce sont les technologies du DAC de Carbon Engineering et de la carbonatation minérale de CarbFix qui obtiennent un résultat global pondéré de 245. En troisième position, c'est la technologie de séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage, avec un résultat global pondéré de 235. C'est la technologie de capture enzymatique et de réutilisation de CO₂ Solutions qui obtient la quatrième place avec un résultat global pondéré de 225. Finalement, en dernière position, c'est la

technologie de capture postcombustion et d'utilisation de la RAP de Petra Nova qui termine avec un résultat pondéré de 145. Les explications concernant ces résultats suivent dans les chapitres ci-dessous.

Tableau 4.5 Résultats de l'analyse multicritère des technologies de capture et séquestration ou capture et utilisation du carbone. T1 : Sleipner CO₂ Storage (séparation industrielle et séquestration sous-marine); T2 : CarbFix (capture et séquestration par carbonatation minérale); T3 : Carbon Engineering (capture directe de l'air et utilisation); T4 : CO₂ Solutions (capture postcombustion avec enzyme et utilisation); T5 : Petra Nova (capture postcombustion et l'utilisation de la RAP)

Volets et critères	Pondération (%)	Résultats non pondérés					Résultats pondérés				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Volet technique											
Année de début d'opération	5	2	1	1	1	1	10	5	5	5	5
Type de projet	5	3	2	2	2	3	15	10	10	10	15
Taux de capture par année	10	3	2	3	2	3	30	20	30	20	30
Usage	10	2	3	2	2	1	20	30	20	20	10
Rendement	10	3	2	3	3	3	30	20	30	30	30
Niveau d'avancement	10	3	2	2	2	3	30	20	20	20	30
Pondération totale	50						135	105	115	105	120
Volet économique											
Coût d'exploitation	5	0	3	2	3	-1	0	15	10	15	-5
Mesures incitatives économiques	10	3	2	2	2	-1	30	20	20	20	-10
Viabilité et faisabilité à long terme	10	2	3	3	3	2	20	30	30	30	20
Pondération totale	25						55	65	60	65	5
Volet environnemental											
Risque de fuite de CO2	5	2	3	2	0	1	10	15	10	0	5
Empreinte environnementale	5	2	3	3	3	-1	10	15	15	15	-5
Atténuation des émissions de CO2	10	2	3	3	3	1	20	30	30	30	10
Permanence du CO2 séquestré	5	2	3	3	2	2	10	15	15	10	10
Pondération totale	25						50	75	70	55	20
Total	100										

	T1	T2	T3	T4	T5
Résultat global pondéré	235	245	245	225	145

4.6 Présentation des résultats du volet technique

Le tableau 4.6 démontre les résultats de la comparaison des technologies de capture et séquestration ou capture et utilisation pour le volet technique. Ce volet a permis de comparer les critères relatifs au fonctionnement et au déploiement des technologies par rapport aux objectifs de développement énumérés à la section 4.2. Les résultats de ce volet montrent que la technologie de capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage a des effets plus favorables quant à l'atteinte des objectifs de développement, c'est-à-dire quant au développement à long terme de la technologie. Toutefois, il est important de prendre en considération que certaines technologies à l'étude ont un niveau d'avancement plus élevé que les autres. Cela leur confère un avantage au niveau de la possibilité de développement. Cependant, les résultats de l'analyse du volet technique ne permettent pas de garantir que d'ici cinq ou dix ans, les autres technologies seront plus aptes à être exploitables ailleurs. Elle a obtenu un résultat pondéré supérieur aux autres technologies qui est de 135. La technologie de capture postcombustion et d'utilisation RAP de Petra Nova vient en deuxième position, suivie de près par la technologie du DAC de Carbon Engineering en troisième position. Vient ensuite les technologies de capture et séquestration par carbonatation minérale (utilisation pour former de la roche carbonatée) et de capture enzymatique et réutilisation de CO₂ Solutions en dernière place avec un résultat pondéré de 105. La justification de ces résultats se retrouve dans les sections suivantes.

Tableau 4.6 Résultats du volet technique. T1 : Sleipner CO₂ Storage (séparation industrielle et séquestration sous-marine); T2 : CarbFix (capture et séquestration par carbonatation minérale); T3 : Carbon Engineering (capture directe de l'air et utilisation); T4: CO₂ Solutions (capture postcombustion avec enzyme et réutilisation); T5 : Petra Nova (capture postcombustion et l'utilisation de la RAP)

Volets et critères	Pondération (%)	Résultats non pondérés					Résultats pondérés				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Volet technique											
Année de début d'opération	5	2	1	1	1	1	10	5	5	5	5
Type de projet	5	3	2	2	2	3	15	10	10	10	15
Taux de capture par année	10	3	2	3	2	3	30	20	30	20	30
Usage	10	2	3	2	2	1	20	30	20	20	10
Rendement	10	3	2	3	3	3	30	20	30	30	30
Niveau d'avancement	10	3	2	2	2	3	30	20	20	20	30
Pondération totale	50						135	105	115	105	120

4.6.1 L'année de début d'opération

Comme il est possible de voir dans le tableau 4.2, les années de début d'opération varient d'une technologie à l'autre. Cependant, malgré les grandes différences dans ces années, l'effet de ce critère sur les objectifs de développement des technologies, émis par l'auteure, est léger. En effet, l'année de début d'opération a surtout un impact sur l'objectif de développement relatif au niveau d'avancement. La technologie du projet Sleipner CO₂ Storage, c'est-à-dire la séparation industrielle et la séquestration en mer, est de loin celle qui

est en activité depuis le plus longtemps (1996). Cela lui a permis de développer une expertise dans la séquestration marine et de surpasser les autres technologies plus récentes avec un niveau d'avancement et un taux de capture supérieur (tableau 4.2). Dans le cas de la matrice d'analyse, le T1 (Sleipner CO₂ Storage) s'est vu octroyer la cote de 2 en raison de son ancienneté supérieure aux autres et aussi du fait que son niveau d'avancement se distingue des autres projets. Cela signifie que sa date de création a un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement, et ce, non parce qu'il est très ancien, mais bien à cause des résultats que le projet a amenés. CarbFix, Carbone Engineering, CO₂ Solutions et Petra Nova sont tous des projets technologiques de la dernière décennie. Malgré le fait que les avancées technologies sont très supérieures à celles des années 90, ces projets sont majoritairement encore au stade pilote avec un taux de capture beaucoup plus faible que le projet Sleipner CO₂ Storage. La cote 1 leur a été attribuée, stipulant que leur année de début d'opération a un effet légèrement favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement.

La considération du critère de l'année de début d'opération est ambiguë étant donné que l'ancienneté d'une technologie ne permet pas de comparer son efficacité. Le niveau d'avancement permet mieux de justifier les taux de capture, mais encore une fois, la comparaison de technologie n'ayant pas amorcé leurs opérations des phases pilotes ou commerciales en même temps n'aura pas le même niveau d'avancement. Au final, il en vient difficile de comparer les technologies entre elles selon leur année de début d'opération puisque la différence est trop importante.

4.6.2 Le type de projet

Ce critère a permis d'identifier le type de projet auquel est rattachée la technologie en question. Les résultats obtenus sont : deux installations à grande échelle et commerciales ainsi que trois projets pilotes et en phase démonstrative. Partant de ces informations, il a été plus simple d'octroyer les cotes sachant que deux projets sur cinq sont déjà des installations en fonction commerciale. Le type de projet a aussi des effets sur les taux de capture et le niveau d'avancement. Ainsi, les deux technologies dont le projet est de niveau commercial sont davantage plus avancées et ont des taux de capture beaucoup plus élevés que les technologies encore au stade pilote. Au niveau des résultats, les deux technologies T1 (Sleipner CO₂ Storage) et T5 (Petra Nova) se sont vues octroyer la cote de 3, signifiant que les technologies ont un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. D'un autre côté, les technologies T2 (CarbFix), T3 (Carbon Engineering), T4 (CO₂ Solutions) ont reçu la cote de 2 signifiant que les technologies ont un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Le choix de répartition des résultats et des cotes a été basé sur le stade du projet et sur l'objectif de développement signifiant que la technologie doit avoir un type de projet qui doit idéalement être exploitable à grande échelle. Comme c'est le cas de tous, une cote positive a été attribuée à toutes les technologies.

La pondération a toutefois été difficile étant donné que le type de projet ne permet pas d'établir les taux de capture ni le rendement des technologies à long terme. Un petit projet non commercial a forcément un taux

de capture plus faible. Le taux de capture n'a aucun rapport à la technologie en particulier, mais est relatif au niveau d'avancement. Il faudrait idéalement tenter d'imaginer toutes les technologies rendues à l'échelle commerciale et ensuite, comparer leur potentiel de séquestration. Cela serait beaucoup plus juste pour la comparaison des cinq technologies. Par contre, il y a nécessairement une grande marge d'erreur si on tente d'extrapoler les résultats d'une technologie en émergence vers un stade commercial qu'elle n'a pas encore atteint.

4.6.3 Le taux de capture par année

L'évaluation de ce critère a permis d'évaluer la performance ainsi que le rendement des technologies en matière de capture du CO₂. La pondération de ce critère est l'une des plus élevées (10%) puisqu'il permet de comparer les capacités de capture des différentes technologies et il ajoute un élément dans la détermination de la technologie ayant le meilleur potentiel de réduction du CO₂. Concernant les résultats, les technologies T1, T3 et T5 se sont vues attribuer une note de 3 puisque leurs taux de capture atteignent les 1 Mt de CO₂ par année (Global CCS Institute, 2018a). Étant les trois technologies avec un taux de capture aussi élevé, il a été conclu que les technologies ont des effets très favorables quant à l'atteinte des objectifs de développement. Parmi ceux-ci, T1, T3 et T5 ont tous les trois un taux de capture suffisamment élevé pour le niveau d'avancement de leur propre technologie. T1 (Sleipner CO₂ Storage), qui est en activité depuis 1996, répond bien à l'objectif puisqu'avec plus de 20 ans d'opération, son taux de capture est l'un des plus élevés. La T3 (Carbon Engineering) a estimé un taux de capture s'élevant aussi à 1 Mt de CO₂ par année pour ses installations prévues à grande échelle. Cependant, à ce jour, Carbon Engineering vient tout juste de signer pour un premier déploiement au Texas. Les taux de capture ne sont donc pas basés sur de vraies installations commerciales, mais sur des prototypes et des estimations. D'ici quelques années, des taux de capture pour la technologie du DAC pourront être relevés et inclus dans de prochaines analyses. Leur taux de capture pour le projet pilote n'a pas été répertorié lors de la recherche. Pour la T5 (Petra Nova), technologie avec séquestration qui est beaucoup plus récente, son taux de capture est très élevé pour un projet ayant amorcé ses opérations en 2017. Les deux autres technologies (T2 et T4) ont toutes un taux de capture inférieur aux trois premiers. Cela aurait comme impact de diminuer grandement la cote attribuée à ces technologies pour ce critère. Par contre, il ne faut pas oublier que ces technologies sont encore en phase pilote, donc leur niveau d'avancement est beaucoup plus faible que les deux premières technologies. Il est donc normal que leur taux de capture soit beaucoup plus faible et cela explique le fait que la cote soit de 2, signifiant que le taux de capture de ces technologies conserve un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Dans ce cas-ci, l'objectif à atteindre est d'avoir un taux de capture suffisamment élevé pour le niveau d'avancement de la technologie. Comme les cinq technologies ont un taux de capture relatif à leur niveau d'avancement et leur type de projet, une cote positive leur a tous été attribuée.

4.6.4 L'usage

Le critère de l'usage inclut la séquestration ou l'utilisation du carbone capturé pour en faire un usage autre que de le séquestrer. Dans le cas des cinq technologies, une seule sur cinq consiste en de la séquestration : T1 – séquestration sous-marine. Les quatre autres technologies consistent au développement de méthodes technologiques utilisant le carbone capturé. En termes de résultats, T1, T3 et T4 ont obtenu un résultat de 2, signifiant que l'effet est favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Plus en détail, la technologie de Sleipner CO₂ Storage utilise une séquestration sous-marine par pipeline dans un aquifère salin ayant un réservoir d'environ 42 000 Mt de CO₂. Étant séquestré à plus de 1000 mètres, le procédé apparaît permanent (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010). Les systèmes de surveillance du réservoir rendent la séquestration sous-marine adéquate et écologique tant qu'aucun séisme ou fissure ne viennent percer la paroi. Il est donc possible d'en conclure que le risque est presque nul étant donné que les séismes sont rares. Toutefois, dans le cas où tous les risques sont évalués, les conséquences d'un séisme pourraient être graves, voire même catastrophiques, quant aux concentrations de CO₂ pouvant être relâchées. Pour la technologie du DAC de Carbon Engineering, sa note de 2 est principalement attribuée par le fait que le carbone, une fois capturé, peut être utilisé pour la récupération assistée du pétrole qui a une réputation mitigée quant à son impact sur l'environnement. L'usage que fait CO₂ Solutions de son carbone capturé lui a valu la note de 2 puisque, jumelé avec l'initiative Valorisation Carbone Québec (VCQ), le CO₂ est utilisé afin de réduire la consommation et la demande en carbone en réutilisant le CO₂ capturé comme source d'alimentation dans certaines usines à proximité. La technologie T2 a obtenu la cote 3, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Pour cette technologie de CarbFix, la carbonatation minérale n'a aucune répercussion écologique pour l'étape des injections du carbone. L'eau utilisée reste potable suite aux processus d'injection du CO₂ liquide dans le basalte. De plus, ce type d'utilisation est permanente puisque le CO₂ forme des minéraux. Finalement, T5 a obtenu une cote de 1, indiquant un effet légèrement favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. La technologie d'utilisation pour RAP de la compagnie Petra Nova a reçu la note de 1 étant donné que cette méthode de séquestration du carbone pour favoriser l'extraction du pétrole n'encourage pas une utilisation adéquate et écologique du carbone.

4.6.5 Le rendement

Concernant le critère du rendement, il est fermement lié avec le critère du taux de capture annuel. C'est pourquoi les résultats sont les mêmes. Les technologies T1, T3, T4 et T5 ont reçu la cote 3, ce qui signifie un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif touché dans le cadre de ce critère est celui précisant d'avoir un rendement de capture suffisamment élevé pour le niveau d'avancement de la technologie. T1 possède un taux de capture annuel d'environ 1 Mt de CO₂, ce qui représente un taux important pour le niveau d'avancement de la technologie. De plus, le projet Sleipner CO₂ Storage a atteint un volume injecté d'environ 12 millions de tonnes de CO₂ séquestrées en 2011 (ZeroCO₂, s.d.) Pour ce qui est de T3 (DAC de Carbon Engineering), son rendement est estimé à 1Mt.

Toutefois, avec les estimations du réel projet à grande échelle du DAC vendu à une industrie au Texas, le taux de capture et le rendement sont estimés à environ 500 kt de CO₂. La cote de 3 est tout de même attribuée à la technologie du DAC, car ce taux de capture est relativement élevé pour une première installation commerciale de ce type. La même cote (3) a été attribuée à T4 (CO₂ Solutions) du fait que sa technologie capture jusqu'à 90% des émissions de GES à la source et qu'elle purifie le CO₂ jusqu'à environ 99.95% (CO₂ Solutions, 2018b). Au niveau de la technologie de CarbFix, une cote de 2 lui a été attribuée, signifiant un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Son rendement de capture du carbone est d'environ 33% des émissions de la centrale Hellisheidi (CarbFix, 2019b). Finalement, T5 (Petra Nova) a aussi obtenu la cote de 3 puisque son rendement de capture est estimé à environ 90% des émissions de la centrale au charbon W. A. Parish (Global CCS Institute, 2018b).

4.6.6 Le niveau d'avancement

Concernant le niveau d'avancement, T1 et T5 ont obtenu une note de 3, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Ces technologies ont obtenu ces cotes-là, car les deux projets sont de stade commercial et à grande échelle depuis déjà quelques années (1996 et 2017). Une cote de 2 a été attribuée aux technologies T2, T3 et T4, car les trois technologies ont complété leurs essais pilotes et sont en voie de poursuivre leurs expérimentations à une autre échelle. Plus particulièrement, CarbFix a complété le premier stade des opérations industrielles et a aussi réussi à doubler sa capacité de capture initiale. Il est actuellement en développement pour joindre sa technologie d'injection avec le DAC et de poursuivre le développement de sa technologie à grande échelle avec la création du CarbFix2 (CarbFix, 2019a). Pour ce qui est du DAC de Carbon Engineering, le projet est en essai pilote depuis 2017, mais a récemment été subventionné par une compagnie américaine afin d'amorcer des procédures de conception d'installations à plus grande échelle, au Texas, en mai 2019. (Carbon Engineering, 2019g) Concernant T4, CO₂ Solutions est un projet encore jeune et il se peut que son niveau d'avancement ne soit pas aussi avancé que d'autres technologies plus anciennes. Pourtant, il a récemment effectué une démonstration à l'usine de pâte et papiers de Saint-Félicien, au Québec, dont les taux de capture ont été estimés à environ 30 tonnes de CO₂ par jour. (voir tableau 4.2) (CO₂ Solutions, 2018b) Étant rendu en phase démonstrative, il est difficile de comparer la technologie de CO₂ Solutions avec des technologies commerciales depuis déjà des années. Malgré que le niveau d'avancement actuel soit plus faible pour les T2, T3 et T4, ces technologies vont accroître leur rendement d'ici une dizaine d'années.

Comme les objectifs de développement font référence au futur, l'analyse qui en est faite réfère au présent. Il est donc normal que les technologies commerciales capturent plus de CO₂ que les technologies en phase démonstratives. Le défi est de se demander si une technologie classée commerciale aura un effet plus favorable dans le futur que les technologies actuellement en phase démonstratives et qui seront commerciales plus tard. À la lumière des informations répertoriées, les trois technologies en phase démonstratives, contribuant peu aux objectifs de réduction actuels, se développeront rapidement. De plus, avec les avancées technologiques, d'autres méthodes, procédés ou technologies de CUC différents vont

voir le jour d'ici la prochaine décennie, améliorant ainsi le rendement de capture des technologies actuelles ou remplaçant totalement les technologies de capture et séquestration actuelles. Le même raisonnement vaut pour le critère du niveau d'avancement.

4.7 Présentation des résultats du volet économique

Le tableau 4.7 démontre les résultats de la comparaison des technologies de capture et séquestration ou capture et utilisation pour le volet économique. Ce volet a permis de comparer les critères relatifs au coût et à la durabilité des technologies par rapport aux objectifs de développement énumérés à la section 4.2. Les résultats de ce volet montrent que la technologie de capture et séquestration par carbonatation minérale (utilisation pour former de la roche carbonatée) et la technologie de capture postcombustion avec enzyme et réutilisation de CO₂ Solutions arrivent à égalité avec un résultat pondéré de 65. Leurs résultats signifient qu'elles ont des effets plus favorables quant à l'atteinte des objectifs de développement, c'est-à-dire quant au développement à long terme des technologies de CSC et CUC. La technologie du DAC de Carbon Engineering vient en troisième position avec un résultat pondéré de 60, suivit par la technologie de capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage en quatrième position (résultat de 50). Finalement, la technologie de capture postcombustion et d'utilisation de la RAP termine en dernière position avec un résultat pondéré de 25. La justification de ces résultats se retrouve dans les sections suivantes.

Tableau 4.7 Résultats du volet économique. T1 : Sleipner CO₂ Storage (séparation industrielle et séquestration sous-marine); T2 : CarbFix (capture et séquestration par carbonatation minérale); T3 : Carbon Engineering (capture directe de l'air et utilisation); T4 : CO₂ Solutions (capture postcombustion avec enzyme et réutilisation); T5 : Petra Nova (capture postcombustion et l'utilisation de la RAP)

Volets et critères	Pondération (%)	Résultats non pondérés					Résultats pondérés				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Volet économique											
Coût d'exploitation	5	0	3	2	3	3	0	15	10	15	15
Mesures incitatives économiques	10	3	2	2	2	-1	30	20	20	20	-10
Viabilité et faisabilité à long terme	10	2	3	3	3	2	20	30	30	30	20
Pondération totale	25						50	65	60	65	25

4.7.1 Les coûts d'exploitation

Pour ce qui est du critère du coût des opérations, l'objectif de ce critère est de déterminer le projet et sa technologie ayant le plus faible coût d'exploitation (\$/tonne de CO₂) afin d'assurer sa viabilité à long terme du côté économique. En matière de résultats, les technologies T2, T4 et T5 ont obtenu une cote de 3, signifiant qu'elles ont un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement, plus particulièrement, sur l'objectif d'avoir un coût d'exploitation du projet abordable et permettant la viabilité de la technologie à long terme. Plus particulièrement, la technologie T2 (la carbonatation minérale de CarbFix)

possède un coût d'exploitation qui est estimé entre 40 et 65 \$ CA par tonne de CO₂ pour le procédé de capture seulement (Utonih et León R., s.d.). Ce coût se situe dans la moyenne des coûts de capture établie avec les autres technologies. Cependant, le coût pour la capture peut sembler être abordable, mais son coût d'exploitation pour les injections dans le sol basaltique est beaucoup plus élevé, s'estimant à environ 2500 \$ CA/tonne (Aradóttir, 2017). Une attention particulière doit être portée pour ces chiffres, car ce sont les coûts estimés pour la phase pilote. Il est possible de prévoir une réduction des coûts dans les prochaines années, si la technologie se développe à plus grande échelle. Pour ce qui est de la technologie T4 (capture enzymatique de CO₂ Solutions), le coût d'exploitation est estimé à environ 25 \$ CA/tonne de CO₂ capturée (Ressources naturelles Canada, 2018b). Sa cote de 3 lui est octroyée puisque son coût de capture par tonne se situe parmi les plus basses de cette présente analyse. De plus, étant une technologie encore en phase démonstrative, les coûts ne sont pas encore fixés et pourraient faire face à des augmentations ou des réductions. Concernant la technologie T5, sa cote de 3 lui a été attribuée puisque son coût d'exploitation est estimé à environ 80 \$ CA/tonne de CO₂ capturée (Schlissel et Wamsted, 2018; Board, 2018). Malgré qu'il soit légèrement plus élevé que les autres coûts, ce dernier reste parmi la moyenne des coûts d'exploitation des technologies analysées. Contrairement aux deux technologies précédentes, la technologie de Petra Nova est établie à grande échelle et au stade commercial. Il risque donc d'y avoir moins de variation au niveau des coûts causés par le développement ou par le changement de phase pilote à commerciale. Par la suite, la technologie T3 (DAC de Carbon Engineering) a reçu la cote de 2, signifiant qu'elle a un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Cette cote lui a été attribuée puisque cette technologie possède des coûts de capture par tonne de CO₂ qui excèdent les coûts des autres technologies analysées dans le présent essai. En 2018, le coût de capture pour le DAC de Carbon Engineering variait entre 94 et 230 \$ CA par tonne de CO₂ (Keith et al., 2018). Cependant, la technologie est en phase démonstrative, donc ses coûts peuvent varier jusqu'à l'établissement de ses installations au stade commercial. De plus, la compagnie de Carbon Engineering vise à réduire le coût de capture à moins de 100 \$ CA/tonne de CO₂. (Carbon Engineering, 2019g) Finalement, la technologie T1 s'est vu octroyer la cote de 0 puisqu'aucune information n'a pu être répertoriée concernant le coût de capture par tonne de CO₂. Toutefois, les coûts d'exploitation annuels généraux sont estimés à 9,2 millions \$ CA. De plus, les coûts de séquestration ont pu être répertoriés : environ 12 \$ CA/tonne de CO₂ injectée (Korsbakken et Aamaas, 2016). Malgré le fait que des coûts divers ont été présentés dans le tableau 4.2, la présente analyse se veut de comparer les coûts du procédé de capture uniquement.

4.7.2 Les mesures incitatives économiques

Concernant le critère des mesures incitatives économiques, tel que précisé dans la section 4.3.2, ce critère estime le niveau de mesures incitatives économiques des industries ou des gouvernements à investir dans ces types de technologies qu'est la capture et séquestration/utilisation du carbone. La technologie T1 a obtenu la meilleure note, avec une cote de 3, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif en vue pour ce critère est celui d'avoir la présence de certaines mesures

incitatives économiques du gouvernement et des entreprises privées à investir dans les projets de capture du carbone et/ou à faire valoir une volonté de changement vers les technologies vertes. Pour la technologie T1, vers la fin des années 90, le gouvernement de la Norvège avait mis en place une nouvelle taxe concernant les émissions de CO₂ en mer. La compagnie Statoil a décidé de séquestrer ses émissions de CO₂ dans un aquifère salin. (Asia-Pacific Economic Cooperation, 2010) Avec cette taxe, le gouvernement a fait transparaître une volonté de changement et de réduction des émissions de GES. Les compagnies émettrices, comme Statoil, ont eu à s'adapter et à trouver une méthode pour éliminer le CO₂. Le projet Sleipner CO₂ Storage a donc été créé, mais le tout débute avec la volonté du gouvernement à réduire les émissions de carbone. Ce niveau de mesures incitatives a valu la cote 3 au projet Sleipner CO₂ Storage. Concernant les technologies T2, T3 et T4, elles ont toutes reçu la cote de 2, signifiant un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. La technologie de CarbFix (T2) justifie cette cote de 2 pour les mesures incitatives économiques de par le partage de sa technologie au sein de l'Union européenne. Le projet et ses partenaires ont reçu un montant d'environ 23,8 millions en dollars canadiens pour leur programme de recherche et d'innovation. (tableau 4.2) La technologie de Carbon Engineering (T3) a aussi reçu cette cote à la suite d'un investissement de 25 millions de dollars canadiens de la part du gouvernement du Canada pour des énergies propres pouvant créer un hydrocarbure à partir du carbone dans l'air. (Carbon Engineering, 2019e) La technologie de CO₂ Solutions a aussi reçu la cote de 2 grâce aux mesures incitatives du gouvernement québécois mises en place pour la réduction des émissions de CO₂. Combiné avec le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES, cette méthode de capture et d'utilisation du CO₂ entre industries permet de réduire les coûts associés aux émissions de GES avec les méthodes de réutilisation directe ou avec conversion. Finalement, quant à la technologie (T5) de Petra Nova, sa technologie lui a valu la cote de -1 pour les mesures incitatives économiques. Cette note signifie un effet légèrement défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Cela est causé par le désir du gouvernement à séquestrer plus de carbone avec la méthode RAP pour contribuer à l'économie américaine. Toutefois, cette méthode de séquestration aide à l'extraction du pétrole et donc, à la production de pétrole domestique. Sur l'aspect économique, cela est avantageux pour le pays, mais du côté environnemental et du changement vers les technologies vertes, cela a un effet négatif. Sachant que l'augmentation de l'extraction du pétrole à faible coût peut mener à une offre plus grande sur le marché, la demande en énergie fossile sera satisfaite au lieu d'être restreinte.

4.7.3 La viabilité et faisabilité du projet à long terme

Concernant la viabilité et faisabilité du projet à long terme, tel que précisé dans la section 4.3.2, ce critère examine si la technologie peut être encore viable si projetée dans quelques années. Il permet d'évaluer si certaines technologies vont devoir cesser leurs activités par manque de ressources. Si un projet et sa technologie sont viables pour les prochaines décennies, la valeur de la technologie sera plus importante qu'une technologie ne pouvant être utilisée qu'à court terme.

Les technologies T2, T3 et T4 ont obtenu la cote de 3, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif cible dans le cadre de ce critère est d'avoir une viabilité à long terme de la technologie de capture et de son système de séquestration/d'utilisation du carbone. Plus précisément, la technologie T2 (CarbFix) s'est vu accorder cette note, car elle possède une forte viabilité à long terme pour sa méthode de capture. Comme les éléments nécessaires sont une source d'eau et un sol basaltique, cette méthode de séquestration peut être très viable à long terme. De plus, sa réussite a permis la création du *Geothermal Emission Control* (GECO) qui a multiplié l'idée de la méthode de CarbFix à grande échelle, dans plusieurs pays. Concernant la technologie T3 de Carbon Engineering, la note de 3 est attribuée, car la technologie du DAC capture le carbone directement de l'atmosphère. Cette technologie sera viable à long terme, puisqu'elle capture le CO₂ atmosphérique. Comme les sources émettrices de CO₂ peuvent prendre du temps avant de se convertir en énergie durable, le DAC sera nécessaire afin d'aider à faire cette transition en captant le carbone restant dans l'atmosphère. La technologie T4 (CO₂ Solutions) a aussi reçu la note de 3, la viabilité du projet est basée sur les industries émettrices de CO₂ et sur la volonté des gouvernements à réduire leurs émissions de CO₂ et mettre en application des technologies de CSC et CUC. Donc, logiquement, tant qu'il y a des industries utilisant le carbone comme source d'alimentation, la technologie de CO₂ Solutions et son initiative de Valorisation Carbone Québec pourront rester en fonction. Finalement, les technologies T1 de Sleipner CO₂ Storage et T5 de Petra Nova se sont vues attribuer une cote de 2, puisque leur viabilité économique et écologique à long terme du projet est basée sur un lieu d'enfouissement et d'injection (RAP) ayant une capacité maximale. Malgré le fait que le projet Sleipner CO₂ Storage possède un puits de séquestration (sous-sol océanique) pouvant être estimée à 40 000 Gt de CO₂, la séquestration dans ce réservoir a un maximum (Jain, Srivastava et Singh, 2016). Une fois rempli, un nouveau site de stockage sera nécessaire, incluant de nouveaux coûts pour les infrastructures, les études de terrains et d'évaluations environnementales. Concernant Petra Nova et son utilisation RAP, si les compagnies décident de ne plus utiliser le CO₂ pour améliorer le rendement d'extraction du pétrole et de faire la transition vers les énergies vertes, cette méthode d'utilisation de la RAP ne sera plus priorisée. Cela pourrait aussi se produire au moment où les ressources d'hydrocarbure seront toutes épuisées. Aucune information sur le moment où cela pourrait arriver n'a été répertoriée, mais il semble logique de s'y préparer. Toutefois, la technologie de capture de ce projet (capture postcombustion) pourra toujours être en activité sur les industries au charbon.

4.8 Présentation des résultats du volet environnemental

Le tableau 4.8 démontre les résultats de la comparaison des technologies de capture et séquestration ou capture et utilisation pour le volet environnemental. Ce volet a permis de comparer les critères relatifs aux risques environnementaux et à la diminution du CO₂ par rapport aux objectifs de développement énumérés à la section 4.2.

Les résultats de ce volet montrent que la technologie de carbonatation minérale (utilisation pour former de la roche carbonatée) a des effets plus favorables à l'atteinte des objectifs de développement

environnementaux, c'est-à-dire quant au développement à long terme. Elle a obtenu un résultat pondéré supérieur aux autres technologies qui est de 75. La technologie du DAC de Carbon Engineering vient en deuxième position avec un résultat pondéré de 70, suivi par la technologie de capture enzymatique et réutilisation de CO₂ Solutions avec un résultat pondéré de 55. Vient ensuite en quatrième position la technologie de capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage avec un résultat pondéré de 50. Finalement, la technologie de capture postcombustion et d'utilisation de la RAP termine en dernière position avec un résultat pondéré de 20. La justification de ces résultats se retrouve dans les sections suivantes.

Tableau 4.8 Résultats du volet environnemental. T1 : Sleipner CO₂ Storage (séparation industrielle et séquestration sous-marine); T2 : CarbFix (capture et séquestration par carbonatation minérale); T3 : Carbon Engineering (capture directe de l'air et utilisation); T4: CO₂ Solutions (capture postcombustion avec enzyme et réutilisation); T5 : Petra Nova (capture postcombustion et l'utilisation de la RAP)

Volets et critères	Pondération (%)	Résultats non pondérés					Résultats pondérés				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Volet environnemental											
Risque de fuite de CO2	5	2	3	2	0	1	10	15	10	0	5
Empreinte environnementale	5	2	3	3	3	-1	10	15	15	15	-5
Atténuation des émissions de CO2	10	2	3	3	3	1	20	30	30	30	10
Permanence du CO2 séquestré	5	2	3	3	2	2	10	15	15	10	10
Pondération totale	25						50	75	70	55	20

4.8.1 Le risque de fuites de CO₂

L'évaluation de ce critère a permis de comparer les risques de fuites de CO₂ pour les différentes technologies de séquestration, mais aussi d'utilisation. À la suite de l'analyse et de la pondération, une cote de 3 a été attribuée à la technologie T2 de CarbFix, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Plus particulièrement, l'objectif est celui d'avoir un risque de fuite de CO₂ faible et contrôlé afin d'éviter une propagation du carbone capturé et séquestré dans l'atmosphère. Cette note a été attribuée étant donné le risque de fuite minime grâce à la minéralisation du CO₂ aqueux dans la roche basaltique. L'injection dans la roche suivie par la minéralisation à court terme (environ deux ans) diminue grandement le risque de fuite. (Matter et al., 2016). Par la suite, une cote de 2 a été attribuée aux technologies T1 et T3, ce qui signifie qu'il y a un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Plus en détail, ce qui permet d'attribuer cette note à ces deux technologies est que, dans le cas du projet Sleipner CO₂ Storage, la séquestration est faite dans les aquifères salins à minimum 1000 mètres de profondeur pour éviter des fuites et un remixage du CO₂ avec l'atmosphère. (Jain, Srivastava et Singh, 2016) Quant à l'autre technologie ayant la cote 2, celle de Carbon Engineering (T3), le risque de fuite de CO₂ dépend de l'utilisation qui en est faite. Dans le cas de l'utilisation de la RAP, les risques sont les mêmes que pour le projet Petra Nova, dont l'objectif est ce type de séquestration. Pour le AIR TO

FUELTM, le risque de fuite est faible puisque le CO₂ est transformé en hydrocarbure dont la chaîne de carbone est complète (pas d'émission de CO₂) (Carbon Engineering, 2019a). La technologie T4 s'est vue octroyer la cote de 0 puisqu'aucune information n'a pu être répertoriée concernant le risque de fuites de la technologie CO₂ Solutions. La cote de 0 signifie qu'il n'y a aucun effet sur l'atteinte des objectifs de développement et cela est justifié par l'absence d'information trouvée sur le sujet du risque de fuites pour cette technologie. De futures recherches pourraient être faites étant donné l'avancée technologique rapide. Finalement, la technologie T5 de Petra Nova a reçu une cote de 1 concernant le risque de fuite de l'utilisation de la RAP, signifiant un effet légèrement favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. La note est justifiée par le risque de fuite de CO₂ plus élevé lors de l'utilisation pour la RAP considérant que le réservoir subit aussi un retrait de pétrole. Le niveau de risque des fuites n'est pas clairement établi, mais les industries en sont conscientes et sont outillées de techniques de surveillance et de détection. (Shimokata, 2018)

4.8.2 L'empreinte environnementale

Le critère de l'empreinte environnementale avait pour but d'évaluer si les technologies peuvent être nuisibles à l'environnement lors de leurs opérations de capture ou de séquestration/utilisation du carbone.

Les technologies T2, T3, et T4 ont obtenu la cote de 3, signifiant qu'elles ont un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif pour ce critère est d'avoir une faible empreinte environnementale afin de ne pas nuire aux écosystèmes en produisant des déchets environnementaux ou en surutilisant les ressources naturelles. Plus en détail, pour la technologie T2 (carbonatation minérale de CarbFix), la note attribuée est justifiée par le fait que la ressource de l'eau potable est fortement utilisée dans les procédés. Toutefois, l'eau utilisée n'est pas contaminée et peut être réutilisée ou consommée après que le CO₂ ait été transformé en carbonate dans la formation géologique (Carbfix, FAQs). De plus, la demande énergétique peut varier entre 2,16 et 4,32 GJ/t CO₂, ce qui peut occasionner une augmentation des coûts pouvant être plus élevé (Wang et al., 2017). Concernant la technologie T3, soit la capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering, sa cote de 3 est d'abord justifiée par le fait que ce type d'installations a une faible empreinte directe sur les sols, car le DAC peut être déployé sur des terrains peu productifs. L'empreinte varie si la source d'énergie est l'air ou le soleil, car il nécessiterait des installations supplémentaires et un terrain plus adapté. Regardant la consommation en énergie de cette technologie, elle nécessite une grande source pour la réaction chimique du DAC et le minimum théorique s'estimait à 1,8 GJ/t CO₂ en 2015 (Smith et al. 2015). Puis, la technologie T4, soit la capture enzymatique et réutilisation de CO₂ Solutions, a aussi obtenu la cote de 3, car ce projet utilise la dépollution de l'air par des technologies de haute efficacité. De plus, la compagnie propriétaire de cette technologie de capture précise qu'aucun déchet, aérosol ou contaminant toxique est généré. (CO₂ Solutions, 2018b) Par la suite, la technologie (T1) de séparation industrielle et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage s'est vu octroyer la cote de 2, signifiant qu'elle a un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Ce résultat lui a été octroyé, car la séquestration possède toujours un risque de fuite ou de contamination. Dans le cas du

projet Sleipner CO₂ Storage, rien ne fait mention d'un taux ou d'un pourcentage de risque environnemental, mais il est évoqué que le risque est présent et qu'en cas de fuite, la contamination et relâchement de CO₂ peut affecter l'eau potable, les écosystèmes en surface et se repartir dans l'atmosphère (Bruant et al., 2002). Finalement, la technologie T5, soit la capture postcombustion et l'utilisation de la RAP de Petra Nova, s'est vu attribué la cote de -1, signifiant un effet légèrement défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Cela est causé par le risque de fuite quant à l'enfouissement du CO₂ dans les réservoirs de pétrole, mais aussi au fait que 10% des émissions de carbone ne sont pas capturés et sont relâchés dans l'atmosphère. Par contre, le projet Petra Nova recycle son CO₂ provenant de l'extraction du pétrole comme énergie au lieu de l'émettre dans l'atmosphère. (Shimokata, 2018)

4.8.3 L'atténuation des émissions de CO₂

Concernant ce critère, il a été défini avec l'objectif d'évaluer le rendement des technologies en termes de retrait du CO₂ de l'atmosphère. Afin de bien pondérer ce critère, les pondérations du rendement et du taux de capture ont été prises en considération afin de déterminer si les niveaux d'atténuation du CO₂ sont relatifs au type de projet et au niveau d'avancement.

Regardant les technologies ayant eu le plus haut résultat pondéré, soit T2, T3 et T4 ont reçu la cote de 3, signifiant un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif pour ce critère est d'avoir une forte atténuation du CO₂ atmosphérique et c'est le cas pour ces quatre technologies. La technologie de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix a un taux de captation du CO₂ qui s'élève à environ 33% des émissions de carbone de la centrale Hellisheidi (CarbFix, 2019b). La cote attribuée à CarbFix reste relativement élevée, car le niveau d'avancement et le type de projet (démonstratif) ont été pris en considération. Pour ce qui est de T3, la capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering, les estimations d'atténuation de CO₂ atmosphérique pour un projet à grande échelle sont de 1 Mt de CO₂ par année. Toutefois, avec le récent achat du DAC par une compagnie du Texas, les estimations de ce projet et de sa nouvelle installation à grande échelle sont de 500 kt de CO₂ par an (Carbon Engineering, 2018g). Pour ce qui est de la T4, technologie de capture enzymatique et réutilisation directe ou avec conversion de CO₂ Solutions, son taux de captation s'élève jusqu'à environ 90% des émissions de GES à la source (CO₂ Solutions, 2018b). T1, soit la capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage, a obtenu la cote de 2, signifiant un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Sa capture et séquestration annuelle est d'environ un million de tonnes de CO₂. Enfin, la technologie de capture postcombustion et utilisation de la RAP de Petra Nova (T5), quant à elle, a reçu la cote de -1, signifiant un effet légèrement défavorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Il est affirmatif de dire que Petra Nova possède aussi un taux de capture d'environ 90% des émissions de la centrale au charbon W. A. Parish (Global CCS Institute, 2018b). Cependant, l'atténuation à long terme du CO₂ diminue si l'aspect d'utilisation du pétrole extrait lors de la RAP est analysé. En effet, comme cette technologie permet d'augmenter le rendement d'extraction du pétrole, l'utilisation secondaire de ce dernier fait augmenter les émissions de CO₂ d'autres secteurs comme celui du transport.

4.8.4 La permanence du CO₂ séquestré

Le critère de la permanence consistait en l'évaluation de la permanence du CO₂ lors de la séquestration ou de l'utilisation.

Pour ce critère, ce sont les technologies T2 et T3 qui ont obtenu la plus haute cote, celle de 3, signifiant qu'elles ont un effet très favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. L'objectif pour ce critère est d'avoir une permanence du CO₂ séquestré et utilisé, sur une période minimale d'un siècle. Plus en détail, pour la technologie T2 (capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix), le résultat est justifié par le fait que le CO₂ est séquestré de façon durable et permanente, en moins de deux ans, grâce à un stockage immédiat par minéralisation. (Matter et al., 2016) Pour la technologie T3 (capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering), la cote de 3 octroyée à cette technologie est attribuable au fait que la permanence dépend de l'utilisation qui est faite du CO₂ après la capture directe. Les trois autres technologies ont reçu la cote de 2, signifiant un effet favorable quant à l'atteinte des objectifs de développement. Plus en détail, concernant la technologie T1 (séparation industrielle et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage), ce résultat est justifié par le fait que le projet Sleipner CO₂ Storage possède un système de quatre types de contrôle pour s'assurer de la permanence de la séquestration. Le contrôle de conformité permet de s'assurer du comportement du CO₂ dans le réservoir. Le contrôle du confinement permet de s'assurer que le CO₂ reste dans le réservoir de stockage. Ils ont pour but de contrôler les imprévus par l'évaluation de mesure d'urgence en cas de fuite et d'assurer la surveillance par télédétection et surveillance sismiques (Furre et al., 2017). Pour l'utilisation de la RAP, la permanence dépend du réservoir. Il y a toujours un risque de fuite possible, mais de nombreuses techniques de surveillance existent. Pour les autres utilisations, la permanence du CO₂ est plus élevée si le risque de fuite est faible, par exemple : dans la création d'un combustible, au niveau de la croissance d'algue pour du biocarburant, l'utilisation du CO₂ dans divers matériaux, l'utilisation par carbonatation minérale, etc. (Styring et al., 2011) De retour aux résultats, la technologie T4, soit la capture postcombustion avec enzyme et réutilisation de CO₂ Solutions, s'est vu attribué la cote de 2 puisque son utilisation directe ou indirecte du CO₂ de son initiative VCQ permet de capturer les émissions de CO₂ des activités industrielles et de les réutiliser comme source d'alimentation pour les industries voisines. Le carbone n'est donc pas séquestré et la capture est considérée comme étant permanente puisqu'elle conduit à un usage différent. Concernant la T5 (la capture postcombustion et l'utilisation de la RAP de Petra Nova), sa cote de 2 lui a été attribuée puisque le projet Petra Nova est équipé de techniques de surveillance par télédétection et de surveillance sismique. Ces systèmes de surveillance ne font pas en sorte que l'utilisation de la RAP est une séquestration permanente, mais elles permettent de minimiser les risques de fuite du CO₂. Le *British Geological Survey* a estimé que la séquestration sous-marine et géologique peut durer plusieurs milliers d'années (UK Research and Innovation, 2019).

4.9 Discussion

Avant de passer aux recommandations suivant l'analyse comparative entre les projets, cette section présentera une brève discussion d'éléments abordés lors de l'essai, ayant soulevé des questionnements chez l'auteure.

Tout d'abord, plusieurs pays et gouvernements, par exemple les États-Unis, voient un certain intérêt économique à séquestrer le CO₂ pour améliorer le rendement d'extraction du pétrole. L'augmentation de ce type de projets de séquestration du carbone pourrait être favorisée par ce contexte économique et réglementaire : autoriser l'extraction du pétrole dans des zones sensibles, augmenter le rendement avec l'enfouissement de CO₂ gazeux dans ces réservoirs, etc. On en vient à se demander si cela est vraiment le but des technologies de capture du carbone, car la production de pétrole est davantage encouragée par la séquestration du CO₂ dans les réserves de pétrole. Comme le pétrole alimente les industries, les moyens de transport et se retrouve dans divers produits à usage unique comme le plastique, s'agit-il d'un cercle vicieux qui ne se terminera que lorsque les réserves pétrolières seront épuisées? La réponse à cette question varie selon les opinions. Les compagnies pétrolières mettront en valeur l'aspect économique, le rendement et les profits qui peuvent en être retirés. Depuis l'accord de Paris en 2015, c'est apparemment ce qui est dénoncé : le peu de participation aux initiatives climatiques des compagnies de pétrole. En mars 2019, une organisation non gouvernementale (ONG) britannique a produit un rapport dans lequel il mentionne que les cinq compagnies pétrolières majeures mondiales ont dépensé environ 1 milliard de dollars afin de détourner l'information dans les médias et d'orienter les réglementations en faveur de l'énergie afin de poursuivre leurs activités dans le domaine des énergies fossiles. De plus, sur environ 115 milliards de dollars d'investissement de ces compagnies, seulement 3% sont dirigés pour l'investissement de projets à faible empreinte carbone. (InfluenceMap, 2019)

Toujours sur le sujet des énergies fossiles, il est possible de remarquer, dans le World Energy Outlook de 2016, rapport axé sur l'énergie, que les technologies de CSC sont toujours affiliées à un procédé procurant de l'énergie, soit une centrale au charbon ou électrique (alimentée par des énergies fossiles). Ce document de niveau international le plus récent étant accessible au public, fait peu ou pas référence à des politiques et à du financement des technologies de CSC. De plus, le financement semble plus encouragé lorsque la technologie de CSC est jumelée à une centrale qui procure de l'énergie. L'intérêt est beaucoup plus grand envers ce type de technologie de CSC tel que l'utilisation de la RAP, surtout si elle est comparée à l'intérêt des technologies comme le DAC qui retire directement de l'atmosphère. Toutefois, il n'est pas à douter de la volonté de certaines entreprises pétrolières voulant aller vers les technologies de capture directe de l'air comme la compagnie Occidental, au Texas. Cependant, l'utilisation même de ce CO₂ capturé ira pour le RAP et augmentera le rendement de la récupération du pétrole.

D'un autre côté, il est possible de se dire que c'est un premier pas vers l'avant, mais l'idée d'un premier pas vers la réduction de carbone atmosphérique ne devrait-elle pas être basée sur la non-réémission après la capture? Par cela, l'auteure entend que le carbone capturé et utilisé à des fins de RAP augmentera le

rendement du pétrole, bien entendu, mais au bout de cette chaîne, le pétrole sera utilisé par d'autres industries, le transport, la voiture individuelle ou même la production de certaines matières. Donc, une utilisation adéquate du CO₂ serait plus avantageuse écologiquement que de le séquestrer pour extraire plus de pétrole. Parmi les projets présentés dans cet essai, trois d'entre eux peuvent utiliser et valoriser le CO₂.

Puis, il y a des auteurs comme Koytsoumpa et McHugh qui avancent que la RAP est économiquement viable à long terme. Mais l'est-ce vraiment? Les dirigeants de plusieurs pays ont démontré leur intérêt à réduire leurs émissions avec la ratification de l'accord de Paris, mais sont-ils prêts à faire les actions nécessaires afin d'y arriver? Certains pays basent leur économie sur le pétrole et s'équipent de technologies de CSC. Cependant, est-ce que la présence de technologies de CSC et CUC sur des projets d'extraction de pétrole et d'industries de charbon est juste une façade pour paraître plus écologique aux yeux du monde? L'économie et la survie d'installations comme Petra Nova sont basées sur les revenus qu'elles font suite à la vente du CO₂ compressé et transporté pour améliorer les rendements d'extraction de pétrole et d'hydrocarbure. L'auteure comprend que l'utilisation de la CSC et CUC auprès de grandes usines et industries pétrolières et de charbon est plus favorable que d'émettre directement le CO₂ dans l'atmosphère, mais il serait plus adéquat d'utiliser le CO₂ à des fins plus écologiques que l'extraction d'autres carburants fossiles qui émettront, à leur tour, du dioxyde de carbone. Bref, l'auteure n'avance pas que la RAP est économiquement viable ou non à long terme, mais il est important de prendre en considération qu'un tournant vers les énergies vertes est prioritaire si l'atteinte des objectifs de réduction est une priorité et cela inclut la diminution de la consommation d'hydrocarbure.

5 RECOMMANDATIONS

À la suite de l'analyse présentée à la section précédente, il est possible de constater que les technologies qui semblent les plus favorables quant à l'application des objectifs de développement sont les technologies de capture et utilisation de la carbonatation minérale de CarbFix et de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering. En effet, avec un résultat pondéré supérieur aux autres pour le volet économique et environnemental, la première place leur a été accordée. Leurs niveaux d'avancement plus faibles que les autres technologies analysées ne les ont pas empêchés d'obtenir la première place puisque cette variable a été prise en considération lors de la pondération. Non loin derrière, c'est la technologie de capture et séquestration sous-marine de projet Sleipner CO₂ Storage qui est arrivé en troisième position, à cause de ses aspects économiques et environnementaux légèrement plus faibles que les autres. Les deux dernières positions sont comblées par CO₂ Solutions et Petra Nova respectivement.

Les technologies de capture présentées dans cet essai ne sont que cinq parmi une multitude actuellement en développement. Les avancées technologiques du domaine de la capture et séquestration ou de la capture et utilisation évoluent très rapidement et de nouvelles technologies ou usages apparaissent chaque année. En restant dans le contexte des cinq technologies à l'étude, leurs méthodes de capture et de séquestration ou utilisation évoluent aussi tout en améliorant le potentiel de retrait de CO₂ de l'atmosphère. La section suivante présentera diverses avancées actuellement en évolution et proposera des recommandations quant à l'application de ces technologies comme outil complémentaire aux efforts d'atténuation de GES.

5.1 Séparation industrielle et séquestration sous-marine inspirée du projet Sleipner CO₂ Storage

Étant une technologie déjà présente à grande échelle, son potentiel de rendement a déjà été démontré au fil des 20 dernières années de son utilisation. Cependant, le facteur plus décisif est la durabilité à long terme de ce type de séquestration, considérant le fait qu'il y ait une capacité maximale au réservoir de stockage. La section qui suit énonce des recommandations applicables à des projets de séquestration sous-marine tels que le projet de Sleipner CO₂ Storage.

1. Un des problèmes majeurs au niveau de la capture et séquestration du carbone est la forte demande en énergie afin de capturer le CO₂. La demande énergétique et son coût sont ainsi très élevés : environ 30% de l'énergie d'une centrale électrique pourrait être nécessaire seulement pour l'étape de la capture (Celia et al. 2015)
2. Les coûts environnementaux ne sont pas considérés comme étant très élevés, mais le risque de fuite des réservoirs sous-marins et des formations salines reste quand même présent. Comme précisé dans le chapitre 3.1, une fuite de CO₂ peut affecter les écosystèmes, l'eau potable, mais aussi retourner amplifier le CO₂ atmosphérique que ces technologies tentent de capturer. Les techniques de surveillance des puits d'injection et des failles sismiques doivent être améliorées afin

de prévenir ce risque de catastrophe. Certaines formations sont profondes avec une forte perméabilité et porosité comme le site d'injection de Sleipner CO₂ Storage (formation Utsira) alors que d'autres sont beaucoup plus minces et peu perméables comme le site d'injection Salah en Algérie. C'est pourquoi les études sur les sites pilotes doivent permettre de comprendre le comportement des réservoirs visés pour la séquestration. Les méthodes de surveillance permettent d'évaluer les effets de la séquestration sur les futurs sites et sur le comportement du CO₂ une fois injecté. (Celia et al. 2015)

3. Le projet Sleipner est, à la base, une industrie qui extrait du gaz naturel de poches de gaz sous-marines. Afin que cette technologie soit un outil adéquat pour la réduction du CO₂ atmosphérique global, le volume de CO₂ capturé doit être au moins supérieur au ratio de CO₂ produit lors de l'extraction du gaz. Afin que ce ratio soit respecté, plusieurs injections de CO₂ devront se faire partout dans le monde, mais cela ne revient qu'à régler une partie du problème. La capture et séquestration marine ne peut être réalisée partout dans le monde. La distribution spatiale des sites de stockage répondant aux critères permettant la séquestration est inégale. Dans certains cas, des systèmes de transport tels que le pipeline sont même nécessaires afin de transporter le CO₂ de la source au lieu de stockage. (Celia et al. 2015)
4. L'espace de stockage des aquifères salins est souvent limité par la pression accumulée. Ainsi, afin d'augmenter cet espace de stockage, il a été proposé d'extraire de la saumure de l'aquifère pour augmenter l'espace et le volume de stockage. Ce retrait du sel de l'eau permettrait à l'aquifère de recevoir un plus grand volume de CO₂ (Birkholzer and Zhou, 2009; Santibanez-Borda et al. 2019). Suivant cette idée, les auteurs Buscheck et al.(2011) et Court et al.(2012) ont démontré des avantages qu'a la production de saumure sur le contrôle de la pression. Ils ont toutefois démontré que la production de saumure n'affectait pas de manière significative le volume de CO₂ pouvant être injecté et ont conclu que cela dépendait des caractéristiques de la formation. Somme toute, les auteurs Court et al. (2012) et Bandilla et Celia (2017) ont prouvé que le risque de fuites de CO₂ pouvait être réduit par l'utilisation et la production de saumure.
5. Finalement, le projet de capture et séquestration dans des formations sous-marines de Sleipner CO₂ Storage n'est utilisée que pour réduire ou éliminer la combustion d'énergie fossile provenant d'industries. Cette méthode de séquestration sous-marines pourrait être combinée avec d'autres technologies à émissions négatives de CO₂ comme le DAC du projet Carbon Engineering afin de réduire systématiquement le carbone atmosphérique. Ensuite, il y aurait la possibilité de séquestrer le CO₂ dans des formations sous-marines ou aquifères salins vides pouvant recevoir des injections de carbone.

5.2 Capture et séquestration par carbonatation minérale inspirée du projet CarbFix

L'emploi de la technologie de carbonatation minérale a déjà atteint le niveau de projet pilote en Islande et son emploi est encouragé à grande échelle par la compagnie CarbFix et le projet GECO en Europe. Dans d'autres régions du monde, la carbonatation minérale est aussi encouragée, par exemple, en Australie, dans l'industrie minière (Azadi et al. 2019). Cependant, la technologie est encore récente au niveau de son exploitation dans d'autres pays. La section qui suit énonce des recommandations applicables à des projets de carbonatation minérale.

1. Selon les auteurs Wang et al. (2017), les recherches fondamentales sur la carbonatation minérale se penchent autant sur l'utilisation *ex situ* (carbonatation hors du sous-sol) qu'*in situ* (injection dans le sol). Selon le type de minéraux utilisé, la demande en énergie peut varier entre 2,16 et 4,32 GJ/t CO₂. Cette forte demande en énergie cause une augmentation des coûts pouvant être très élevés (Wang et al., 2017). D'un premier côté, il pourrait être utile de trouver une autre source pouvant procurer de l'énergie à moindre coût. L'utilisation d'énergie verte et renouvelable comme l'éolien ou le solaire pourrait être envisagée pour les différents pays intéressés. Dans le cas de l'Islande, c'est déjà une énergie verte qui est utilisée, soit la géothermie. D'un autre côté, les auteurs Wang et al. (2017) précisent aussi qu'il n'y a pas encore de pratique ou méthode de carbonatation minérale *ex situ* qui soit applicable actuellement, mais que des recherches se concentrent là-dessus. Comme mentionné plus haut, l'Australie a commencé l'étude des méthodes *ex situ* avec les déchets miniers d'industries minières. Cette méthode *ex situ* de la carbonatation minérale jumelée avec des industries minières pourrait être utilisable dans plusieurs pays où les ressources naturelles minières sont favorisées.
2. L'utilisation du *direct air capture* (DAC) pourrait être jumelée avec la carbonatation minérale. En effet, la technologie du DAC permet de capturer le CO₂ de l'air, mais une fois capturé, le jumelage avec la technologie de carbonatation minérale permettrait de séquestrer le CO₂ sous forme de roche, créant des émissions négatives et séquestrées dans la roche de façon permanente. C'est ce que planifie de faire la compagnie CarbFix, en Islande, avec son projet CarbFix2. (CarbFix, 2019a; Gutmnecht et al. 2018)
3. La méthode de carbonatation minérale utilisée en Islande, pour le projet pilote de CarbFix, est la séquestration du CO₂ dans le basalte. Comme cette méthode *in situ* a démontré son efficacité, plusieurs autres projets de carbonatation minérale se développeront dans les prochaines années (Wang et al., 2017). De plus, il serait intéressant d'inclure des utilisations à la roche carbonatée que créer la carbonisation minérale. Ainsi, si la réaction est faite en surface, par exemple lors de méthodes *ex situ*, ce type de roche pourrait peut-être être utilisé dans la mise en place d'infrastructures ou autres.

5.3 Capture directe de l'air et réutilisation diverse inspirée du projet DAC de Carbon Engineering

La technologie du DAC est l'une des seules technologies pouvant réduire de façon négative les émissions de GES. En captant directement le CO₂ de l'air, il suffit d'en faire un bon usage afin que le carbone ne retourne pas dans l'atmosphère d'une autre façon. Certaines compagnies pétrolières privées vont investir dans cette technologie (le DAC) afin d'utiliser le carbone pour la RAP. Toutefois, si l'objectif est de réduire les émissions de GES et de CO₂, il serait plus avantageux de diminuer la dépendance aux énergies fossiles et de se diriger plus vers les énergies durables. La section qui suit énonce des recommandations applicables à des projets de DAC.

1. Le DAC demande une grande source d'énergie (minimum théorique d'environ 1,8 GJ/t CO₂ en 2015) et donc, amène des coûts d'exploitation plus élevés. Il est possible que le niveau d'énergie demandé ait diminué en cinq ans, mais aucune donnée n'a été répertoriée. La recherche et le développement de cette technologie doivent être concentrés sur la réduction des coûts et de la demande énergétique (Smith et al. 2015). Pour ce faire, de nouvelles sources d'énergie à moindre coût peuvent être jumelées à la technologie du DAC comme l'énergie éolienne, solaire, etc. (Breyer et al. 2019)
2. Plusieurs compagnies privées de combustibles fossiles financent la technologie du DAC principalement dans le but de l'utiliser pour de la RAP (voir l'exemple d'*Occidental* du Texas ayant financé le DAC de Carbon Engineering en mai 2019). Cependant, utiliser cette technologie dans le but de développer les méthodes de RAP ne fait que neutraliser les émissions de CO₂, cela ne rend pas les émissions négatives. Afin d'atteindre les objectifs de réduction et d'utiliser la technologie du DAC comme méthode de capture d'émissions négatives, elle doit être combinée à des méthodes de séquestration ou d'utilisation n'émettant pas de GES lors de leurs activités.
3. Il pourrait être suggéré de jumeler la technologie du DAC avec d'autres technologies déjà existantes ou en projet pilote telles que CarbFix, comme énoncé plus haut. Il pourrait être recommandé de jumeler la technologie du DAC avec une forme de stockage sécuritaire afin d'éviter que le CO₂ retourne dans l'atmosphère. La réutilisation du CO₂ dans des procédés industriels ou la séquestration dans le sous-sol marin en sont des exemples. Dans d'autres cas, la valorisation ou l'utilisation du carbone permet de lui donner une seconde vie et évite de le séquestrer et de risquer des fuites. Dans le cas de Carbon Engineering, la compagnie vise à créer une solution à base d'hydroxyde de potassium pour produire un carburant faible en carbone (AIR TO FUEL™) (Carbon Engineering, 2019a). Dans d'autres cas, le CO₂ peut être réutilisé dans l'industrie chimique, pour la conception de produit comme le méthane, le méthanol, les alcanes, dans l'industrie des polymères et aussi dans d'autres secteurs comme le transport et les centrales électriques (Al-Mamoori et al., 2017).

4. Il serait pertinent aussi d'établir les endroits pouvant recevoir adéquatement le type d'installations du DAC. Les auteurs Psarras et al. (2017) ont établi une carte des États-Unis avec les régions où il est potentiellement possible d'installer des équipements de DAC. Les auteurs ajoutent aussi que les régions doivent avoir le potentiel de faire fonctionner les installations du DAC avec les énergies solaires et éoliennes. Avec un type de carte similaire, mais à une échelle plus grande, il pourrait être possible d'établir les différents endroits dans le monde pouvant recevoir ces équipements tout en les faisant fonctionner avec une source d'énergie durable et moins coûteuse.
5. Finalement, il faudrait que les gouvernements mettent en place une réglementation concernant les émissions de carbone des industries. Ainsi, les industries émettrices pourraient s'équiper de la technologie du DAC et bénéficier de certains privilèges concernant leur réduction d'émissions. Par exemple, au Québec, les industries pourraient s'équiper du DAC et ainsi créer des émissions de carbone négatives. Jumelées avec le Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émissions, les industries pourraient vendre leurs crédits de carbone. (Gouvernement du Québec, n.d) Dans certains pays, comme le Canada, la réglementation est déjà présente, mais ce type d'approche devrait être accentué.

5.4 Capture postcombustion par enzyme et réutilisation du CO₂ inspirée du projet de CO₂ Solutions

Le projet de capture du carbone par enzyme de CO₂ Solutions a été mis en service dans une usine au Québec et s'est avéré un succès. En plus d'avoir plusieurs avantages au niveau environnemental avec ses émissions nulles, le projet pilote de la technologie de capture par enzyme de CO₂ Solutions a permis d'estimer les coûts à 25\$ la tonne de CO₂ captée (Ressources naturelles Canada, 2018b). La technologie est déjà avancée technologiquement, mais elle a cependant été classée en dernière position au niveau du volet technologique. Cela peut être causé par son niveau d'avancement plus faible que les autres. Les recommandations principales pour l'utilisation de cette technologie sont les suivantes :

1. Comme la technologie semble prête au déploiement commercial, il serait important de trouver des utilisations au CO₂ une fois qu'il est capturé. CO₂ Solutions et les autres projets de capture du carbone par enzyme doivent travailler sur le développement d'utilisation du CO₂ à faible coût. Il peut s'agir d'utiliser le CO₂ comme matière première pour divers produits comme des combustibles, des produits chimiques et des plastiques. (Ressources naturelles Canada, 2018b)
2. Le déploiement à grande échelle commercial de la technologie de CO₂ solutions devrait être applicable à une multitude d'industries telles que celles consistant en la production de sables bitumineux, du ciment, de métaux et pâte et papier. Plus la technologie sera applicable à une plus

grande diversité d'industrie, plus la technologie pourrait être un atout pour le Canada dans l'atteinte de ses objectifs de réduction. (Ressources naturelles Canada, 2018b).

5.5 Capture postcombustion et l'utilisation de la RAP inspirée du projet Petra Nova

La présente analyse a démontré que la technologie de capture postcombustion a un désavantage au niveau de son impact sur l'environnement. En effet, c'est la technologie ayant un plus haut risque d'impacter l'environnement. En prenant en considération l'impact de la RAP et de l'utilisation du pétrole, cette méthode d'utilisation du carbone, dans le but d'augmenter le rendement d'extraction de pétrole, ne fait qu'augmenter la consommation mondiale en énergie fossile. Toutefois, il s'est avéré que, pour le projet Petra Nova, le coût d'exploitation de la capture se situe dans la moyenne des coûts répertoriés pour les technologies du présent essai (voir tableau 4.2). Afin qu'un projet de cette taille soit adaptable ailleurs dans le monde, sa mise en exploitation ne doit pas atteindre des coûts exorbitants, car certains pays ou compagnies ne pourraient pas se le permettre. La section qui suit énonce des recommandations applicables à des projets de capture postcombustion et d'utilisation de RAP.

1. Il faudrait équiper les nouvelles centrales au charbon de technologies de capture postcombustion afin de réduire immédiatement les émissions de CO₂. Le coût d'exploitation pourrait être réduit, afin que plus de centrales ou industries puissent s'équiper de ce type de technologie de capture du carbone. Pour réduire les coûts, la source d'alimentation en énergie pourrait être modifiée et améliorée de façon plus écoresponsable.
2. La possibilité d'utiliser le CO₂ capturé à d'autres fonctions que la RAP pourrait être émise. Mise à part l'utilisation avec la RAP, le CO₂ capturé pourrait être vendu à d'autres industries ayant des besoins en carbone pour le fonctionnement de leurs installations (reprise de l'initiative Valorisation Carbone Québec).
3. Il serait suggéré de mettre en place des systèmes de taxation plus stricts envers les grands émetteurs de CO₂ dans le domaine pétrolier ou du charbon. Aux États-Unis, là où le projet Petra Nova est situé, le gouvernement a récemment adopté un projet de loi S.383, le *USE IT Act*, concernant le support accordé aux recherches sur la capture et utilisation du carbone et sur le DAC (Barrasso, 2019). Des réglementations concernant le support et le développement de ce type de technologie devraient être favorisées par tous les gouvernements, considérant que les technologies de CSC font partie des stratégies permettant d'atteindre les objectifs de réduction mondiaux.

5.6 Recommandations de l'essai

Le sujet des technologies de CSC, mais aussi de l'utilisation et valorisation du carbone, est très actuel et les informations peuvent varier de jour en jour. Comme certaines recherches ou certaines informations n'ont pu être répertoriées dans le cadre du présent essai, à titre de suggestions, l'auteure a formulé des recommandations pour une étude future sur un sujet similaire.

1. De futures recherches pourraient être mises de l'avant afin de déterminer plus en détail les aspects négatifs. Comme la présente étude porte sur un sujet très récent, il a été difficile de déterminer des côtés négatifs. Une forte majorité des technologies, lors de la recherche primaire et secondaire, étaient encore en phase pilote ou laboratoire. Toutefois, comme les avancées technologiques se développent rapidement, en quelques mois, de nouvelles sources et rapports peuvent apporter des informations manquantes au présent essai.
2. Étant un essai de maîtrise et non une thèse, le présent projet avait une limite au niveau du temps et du nombre de pages. Une suggestion pourrait d'élargir la recherche sur plusieurs technologies (plus que cinq) afin de couvrir un plus grand échantillon de technologies.
3. Il pourrait être intéressant d'étudier l'aspect social, afin de démontrer l'acceptabilité sociale des systèmes de capture ou d'utilisation du carbone. Étant des technologies au développement récent, une population plus informée pourrait augmenter le degré de confiance de la population envers ces technologies. D'un autre côté, si l'acceptabilité sociale des technologies est affaiblie par une mauvaise compréhension de celles-ci, cela pourrait être causé par un écart de connaissances et de perception entre le public et les parties prenantes. (Science Advice for Policy by European Academies, 2018)
4. Au niveau de la section recommandations, il a été difficile d'élaborer des conseils pouvant être proposés à des technologies qui en sont encore à des stades pilotes. D'un autre côté, il a aussi été difficile de recommander des actions auprès de projets de capture qui sont déjà parvenus au stade commercial sachant que des chercheurs tentent de perfectionner ces méthodes de capture et de développer de nouvelles utilisations du carbone. Étant un domaine qui change très rapidement, de nouvelles méthodes et usages sont créés chaque année. Certaines actions n'ont pas été recommandées par l'auteure, mais peuvent être développées afin de mener au perfectionnement de ces technologies.

CONCLUSION

En conclusion, l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre est un des objectifs principaux de l'accord de Paris. Cependant, les méthodes gouvernementales pour contrer les effets de la hausse des températures et des changements climatiques semblent insuffisantes pour atteindre les objectifs de réduction. L'attrait envers les technologies de géo-ingénierie grandit au fil des années, plus particulièrement envers les technologies de CSC ainsi que de CUC qui permettraient une réduction des émissions de GES grâce à des méthodes inventées par l'homme. Plus récemment, le développement de la capture et utilisation du carbone a fait son arrivée, utilisant le dioxyde de carbone pour des usages secondaires comme l'injection dans la roche et la réutilisation dans des procédés industriels. Ces technologies ont toutes des méthodes qui diffèrent les unes des autres, mais ont toutes pour objectif commun d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Dans cette optique, l'objectif de l'essai était d'évaluer des technologies de capture et séquestration et de capture et utilisation du carbone parmi celles qui présentent le plus d'effets favorisant les objectifs de développement introduits par l'auteure au chapitre quatre. Afin de répondre à l'objectif, une analyse multicritère a été réalisée en utilisant 13 critères déterminés selon leurs effets sur le volet technique, économique et environnemental. En considérant certains paramètres techniques, économiques et environnementaux, cinq projets associés à la géo-ingénierie (combinaison de CSC et CUC) ont été retenues : la technologie de capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage, la technologie de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix, la technologie de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering, la technologie de capture postcombustion avec enzyme et réutilisation directe ou avec conversion de CO₂ Solutions et la technologie de capture postcombustion et l'utilisation de la récupération assistée du pétrole de Petra Nova.

Les résultats ont démontré que les technologies de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix et de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering se situent en première place, car elles permettent le plus d'atteindre les objectifs de développement établis par l'auteure. La technologie de capture et séquestration par carbonatation minérale de CarbFix passe par le processus de fixation du CO₂ dans les sols basaltiques afin de former de la roche carbonatée avec le CO₂. Avec cette méthode, le CO₂ est séquestré de façon permanente, sous forme de solide, à l'aide de processus de minéralisation sous terrain ou hors terre. Cette technologie encore récente est exploitée dans les gisements de basalte en Islande, mais effectue des projets à plus petite échelle, à travers le monde, afin d'élargir sa visibilité. Ce type technologie de capture et utilisation favorise une viabilité et faisabilité à long terme de par ses injections nécessitant peu de ressource et ses lieux d'injection à grande échelle. La technologie de capture directe de l'air et utilisation de Carbon Engineering est une technologie capturant le CO₂ directement de l'air ambiant et serait une mesure adéquate pour atténuer les concentrations de CO₂ de l'atmosphère. Cette technologie a l'avantage de pouvoir être déployée facilement puisqu'elle n'a pas de restriction au niveau du lieu d'exploitation ou concernant l'utilisation de ressources. Cependant, de grandes sources d'énergie sont nécessaires pour alimenter la technologie et l'ajout d'une source d'énergie renouvelable pourrait être un ajustement profitable. La technologie de capture et séquestration sous-marine de Sleipner CO₂ Storage se

place en troisième position. Cette technologie de séquestration dans un aquifère salin utilise un procédé de capture postcombustion, une fois la combustion complétée, et une séparation industrielle du CO₂. Cette technologie du projet Sleipner CO₂ Storage avait l'avantage sur le volet technique, car le projet est très avancé comparé aux autres. Son niveau d'avancement supérieur lui permet, à ce jour, de capturer et de séquestrer plus de CO₂ que les autres technologies, soit environ 1 Mt de CO₂ par an. Cependant, la longévité du projet est un facteur réduisant la capacité à long terme de la technologie puisqu'elle est dépendante d'un réservoir sous-marin ayant une capacité maximale. De plus, le risque de fuite, quoique minime, peut s'avérer très important si une fissure ou un séisme venaient à endommager la paroi du réservoir. La technologie de capture postcombustion avec enzyme et réutilisation directe ou avec conversion de CO₂ Solutions se place en quatrième position. Cette technologie, basée sur la capture enzymatique du CO₂, a un effet positif au niveau environnemental de par sa purification presque complète du CO₂ (95%) et de ses émissions de déchets nulles. Étant une technologie récente et encore en phase démonstrative, le niveau d'avancement devait être pris en considération dans l'évaluation de certains critères pour cette technologie. De plus, la technologie enzymatique est viable à long terme puisque ses activités ne dépendent pas de ressources non durables. Il serait donc intéressant de trouver des utilisations au CO₂ et de rendre la technologie adaptable à différents types d'industries. En dernière position se trouve la technologie de capture postcombustion et l'utilisation de la récupération assistée du pétrole de Petra Nova. Cette technologie doit son résultat au fait qu'elle est utilisée pour la récupération assistée du pétrole et que la viabilité à long terme de cette ressource n'est pas durable. La demande et consommation en pétrole et en combustibles fossiles doivent être diminuées pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris et cette technologie de CUC ne doit pas être considérée comme une stratégie à long terme, mais plutôt à court terme. La technologie a toutefois un niveau d'avancement supérieur ce qui lui permet de capturer et de séquestrer de plus grande quantité de carbone. Les centrales au charbon devraient continuer d'être équipées de cette technologie de capture, mais une autre fonction que la récupération assistée du pétrole devrait être envisagée afin de réduire les émissions de GES à plus long terme.

En somme, les technologies de CSC et de CUC restent des solutions additionnelles aux efforts potentiels de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour contrer les changements climatiques. L'implantation de ces technologies va nécessiter un partage des efforts entre la technologie et l'Homme pour atteindre le niveau d'efficacité nécessaire aux atteintes des objectifs mondiaux. Une réduction de la consommation en énergies fossiles de la part de l'Homme et un changement vers les énergies vertes est une stratégie à appliquer simultanément aux technologies de CSC et CUC. Ainsi, les gouvernements et les institutions doivent déployer des mesures d'atténuation pour les changements climatiques et des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour diminuer les émissions à la source. Bref, il est nécessaire de mettre en place des changements de comportement communs auprès des individus, des gouvernements, de l'économie et des méthodes de production, car tout le monde doit participer à la réduction de l'empreinte carbone.

RÉFÉRENCES

- Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A., & Rezaei, F. (2017). Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technology*, 5(6), 834-849. <https://doi.org/10.1002/ente.201600747>
- Aminu, M. D., Nabavi, S. A., Rochelle, C. A., & Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208, 1389-1419. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.015>
- Aradóttir, E. S. (2017). Rapid CO₂ mineral sequestration in basalts. Stanford. Repéré à <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/basc/miscellaneous/gs-workshop/4-aradottir.pdf>
- Asia-Pacific Economic Cooperation. (2010). Assessment of the Capture and Storage Potential of CO₂ Coproduced with Natural Gas in SouthEast Asia. Repéré à <http://publications.apec.org/Publications/2010/05/Assessment-of-the-Capture-and-Storage-Potential-of-CO2-Coproduced-with-Natural-Gas-in-SouthEast-Asia>
- Azadi, M., Edraki, M., Farhang, F., & Ahn, J. (2019). Opportunities for Mineral Carbonation in Australia's Mining Industry. <https://doi.org/10.3390/su11051250>
- Bandilla, K. W., & Celia, M. A. (2017). Active pressure management through brine production for basin-wide deployment of geologic carbon sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.030>
- Bandyopadhyay, A. (2014). *Carbon capture and storage : CO₂ management technologies*. (1^{re} éd.). (S.I.) : Apple Academic Press. Repéré à <https://ebookcentral.proquest.com>
- Barrasso, J. (2019). S.383—USE IT Act. [webpage]. Repéré à <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/383/text>
- Birkholzer, J. T., & Zhou, Q. (2009). Basin-scale hydrogeologic impacts of CO₂ storage : Capacity and regulatory implications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(6), 745-756. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.002>
- Board, A. (2018). USA : Experts: Coal Plants Must Adapt to New Energy Landscape. *IEA Clean Coal Centre*. Repéré à <https://www.iea-coal.org/usa-experts-coal-plants-must-adapt-to-new-energy-landscape/>
- Breyer, C., Fasihi, M., & Aghahosseini, A. (2019). Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity : A new type of energy system sector coupling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y>
- Bruant, R. G., Jr., Jr., Celia, M. A., Guswa, A. J., & Peters, C. A. (2002). Peer Reviewed : Safe Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers. *Environmental Science & Technology*, 36(11), 240A-245A. <https://doi.org/10.1021/es0223325>
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., ... Dowell, N. M. (2018). Carbon capture and storage (CCS) : The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Buscheck, T. A., Sun, Y., Hao, Y., Wolery, T. J., Bourcier, W., Tompson, A. F. B., ... Aines, R. D. (2011). Combining brine extraction, desalination, and residual-brine reinjection with CO₂ storage in saline formations : Implications for pressure management, capacity, and risk mitigation. *Energy Procedia*, 4, 4283-4290. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.378>
- Carbfix. (2019a). CarbFix2. Repéré à <https://www.carbfix.com/carbfix2>

- CarbFix. (2019b). FAQs. Repéré à <https://www.carbfix.com/faqs>
- CarbFix. (2019c). GECO. Repéré à <https://www.carbfix.com/geco>
- CarbFix. (2019d). Our story. Repéré à <https://www.carbfix.com/our-story>
- CarbFix. (2019e). What is CarbFix? Repéré à <https://www.carbfix.com/what-carbfix>
- Carbon Engineering. (2019a). About Air to Fuels technology. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/about-a2f/>
- Carbon Engineering. (2019b). About Direct Air Capture Technology. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/about-dac/>
- Carbon Engineering. (2019c). About Us. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/company-profile/>
- Carbon Engineering. (2019d). Carbon Engineering concludes USD\$68 million private investment round and proceeds with commercialization of carbon dioxide removal technology. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/carbon-engineering-concludes-usd68-million-private-investment-round/>
- Carbon Engineering. (2019e). Government of Canada invests \$25m in clean energy technology that creates fuel from air. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/government-of-canada-invests-25m/>
- Carbon Engineering. (2019f). History and Trajectory. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/history-and-trajectory/>
- Carbon Engineering. (2019g). Oxy Low Carbon Ventures and Carbon Engineering begin engineering of the world's largest Direct Air Capture and sequestration plant. *Carbon Engineering*. Repéré à <https://carbonengineering.com/worlds-largest-direct-air-capture-and-sequestration-plant/>
- Celia, M. A., Bachu, S., Nordbotten, J. M., & Bandilla, K. W. (2015). Status of CO₂ storage in deep saline aquifers with emphasis on modeling approaches and practical simulations. *Water Resources Research*, 51(9), 6846-6892. <https://doi.org/10.1002/2015WR017609>
- Center for Climate and Energy Solutions. (2019). U.S. State Carbon Pricing Policies. *Center for Climate and Energy Solutions*. Repéré à <https://www.c2es.org/document/us-state-carbon-pricing-policies/>
- Center for Environmental Visualization. (2014). Ocean Carbon Storage. Repéré à http://www.cev.washington.edu/file/Ocean_Carbon_Storage
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., & Park, Y.-K. (2016). Production and utilization of biochar : A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chalmin, A. (2019). Direct Air Capture : Recent developments and future plans. *Geoengineering Monitor*. Repéré à <http://www.geoengineeringmonitor.org/2019/07/direct-air-capture-recent-developments-and-future-plans/>
- Chapman, I. (2014). The end of Peak Oil? Why this topic is still relevant despite recent denials. *Energy Policy*, 64, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.010>
- CO₂ Capture Project. (2015). What is CO₂ Capture and Storage? Repéré à https://www.co2captureproject.org/what_is_co2_capture_storage.html

- CO2 Capture Project. (2015). What is CO2 Capture and Storage? Repéré à https://www.co2captureproject.org/what_is_co2_capture_storage.html
- CO2 Solutions. (2018a). Applications. Repéré à <https://co2solutions.com/applications/>
- CO2 Solutions. (2018b). Avantages distinctifs. Repéré à <https://co2solutions.com/avantages/>
- CO2 Solutions. (2018c). Contexte et types d'applications. Repéré à <https://co2solutions.com/chapters/3/>
- CO2 Solutions. (2018d). Faire du dioxyde de carbone un gaz à effet de profit. Repéré à <https://co2solutions.com/valorisation-carbone-quebec/>
- CO2 Solutions. (2018e). Historique. Repéré à <https://co2solutions.com/historique/>
- CO2 Solutions. (2018f). Poumon Industriel. Repéré à <https://co2solutions.com/poumon-industriel/>
- CO2 Solutions. (2018g). Projet Valorisation Carbone Québec. Repéré à <https://co2solutions.com/chapters/4/>
- CO2 Solutions. (2018h). Réutilisation. Repéré à <https://co2solutions.com/reutilisation/>
- CO2 Solutions. (2018i). Séquestration. Repéré à <https://co2solutions.com/sequestration/>
- CO2 Solutions. (2019a). CO₂ Solutions annonce les résultats financiers du troisième trimestre 2019 et fait la mise à jour sur le projet de Saint-Félicien. *Cision*. Repéré à <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/co2-solutions-annonce-les-resultats-financiers-du-troisieme-trimestre-2019-et-fait-la-mise-a-jour-sur-le-projet-de-saint-felicien-843161818.html>
- CO2 Solutions. (2019b). CO₂ Solutions met en service son unité de capture du carbone à l'usine de pâte de Résolu à Saint-Félicien, au Québec. Repéré à <https://co2solutions.com/nouvelles/co-solutions-met-en-service-son-unite-de-capture-du-carbone-lusine-de-pate-resolu-saint-felicien-quebec/>
- Court, B., Bandilla, K. W., Celia, M. A., Buscheck, T. A., Nordbotten, J. M., Dobossy, M., & Janzen, A. (2012). Initial evaluation of advantageous synergies associated with simultaneous brine production and CO₂ geological sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 8, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.12.009>
- David, J., & Herzog, H. J. (s.d.). The Cost of Carbon Capture. *Massachusetts Institute of Technology*, 6.
- Federal Control of Greenhouse Gas Emissions. (2012). Environmental Law. Repéré à <http://elawreview.org/articles/volume-40/issue-40-4/federal-control-of-greenhouse-gas-emissions/>
- Figuerola, J. D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., & Srivastava, R. D. (2008). Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(1), 9-20. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). Agri-Environmental Indicators. FAOSTAT. Repéré à <http://www.fao.org/faostat/en/?#data/>
- Furre, A.-K., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J. N., & Kiær, A. F. (2017). 20 Years of Monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916-3926. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1523>
- Gibbins, J., & Chalmers, H. (2008). Carbon capture and storage. *Energy Policy*, 36(12), 4317-4322. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.058>

- Gim, B.-M., Choi, T. S., Lee, J.-S., Park, Y., Kang, S.-G., & Jeon, E.-C. (2013). Evaluation System of Environmental Safety on Marine Geological Sequestration of Captured Carbon Dioxide. <https://doi.org/10.7846/jkosmee.2013.16.1.42>
- Global CCS Institute. (2018a). Facilities. Repéré à <https://co2re.co/FacilityData>
- Global CCS Institute. (2018b). The Global Status of CCS 2018. Repéré à <https://indd.adobe.com/view/2dab1be7-edd0-447d-b020-06242ea2cf3b>
- Global CCS Institute. (2018). The Global Status of CSC 2018. Repéré à <https://indd.adobe.com/view/2dab1be7-edd0-447d-b020-06242ea2cf3b>
- Global CCS Institute. (2018c). Transport. *Global CCS Institute*. Repéré à <https://www.globalccsinstitute.com/why-ccs/what-is-ccs/transport/>
- Global CCS Institute. (2018d). Understanding CCS. *Global CCS Institute*. Repéré à <https://www.globalccsinstitute.com/why-ccs/what-is-ccs/>
- Gouvernement du Canada. (2017). Polluants climatiques de courte durée de vie. <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/action-pour-climat/polluants-climatiques-courte-duree-vie.html>
- Gouvernement du Canada. (2019). Mode de fonctionnement de la tarification de la pollution. *Aem*. [description de programme;mesures prises]. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/fonctionnement-tarification-pollution.html>
- Gouvernement du Québec. (s.d.). Le Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission—En bref. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf>
- Government of Iceland. (s.d.). Iceland launches new Climate Strategy, boosting efforts to reach Paris goals. Repéré à <https://www.government.is/news/article/2018/09/10/Iceland-launches-new-Climate-Strategy-boosting-efforts-to-reach-Paris-goals/>
- Gutknecht, V., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Aradóttir, E. S., & Charles, L. (2018). Creating a carbon dioxide removal solution by combining rapid mineralization of CO₂ with direct air capture. *Energy Procedia*, 146, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.017>
- Haszeldine, R. S. (2009). Carbon Capture and Storage : How Green Can Black Be? *Science*, 325, 7.
- Herzog, H. J. (2001). What Future for Carbon Capture, 35(7), 148A-153A.
- ico2n. (2015). Carbon capture and utilization.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (s.d.). A Brief History of CSC and Current Status, 1.
- InfluenceMap. (2019). *Big Oil's Real Agenda on Climate Change*. Repéré à <https://influencemap.org/report/How-Big-Oil-Continues-to-Oppose-the-Paris-Agreement-38212275958aa21196dae3b76220bddd>
- Innovation Fluides Supercritiques. (s.d.). Découvrir, exploiter les fluides supercritiques. Repéré à <http://www.portail-fluides-supercritiques.com/Fluides-supercritiques.55.0.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C*. (S.I.) : (s.n.). Repéré à <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

- International Energy Agency. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017*. Repéré à <https://webstore.iea.org/energy-technology-perspectives-2017>
- International Energy Agency. (2019a). Carbon capture, utilisation and storage. Repéré à <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/>
- International Energy Agency. (2019b). Utilisation. Repéré à <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/utilisation/>
- International Energy Agency. (s.d.). Five Keys to Unlock CCS Investment. Repéré à <https://www.iea.org/media/topics/ccs/5KeysUnlockCCS.PDF>
- Jain, N., Srivastava, A., & Singh, T. N. (2016). Geologic Carbon Sequestration | SpringerLink. Dans *SpringerLink* (Springer, pp. 3-18). (S.I.) : V. Vishal, T.N. Singh. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/book/10.1007/978-3-319-27019-7>
- Jenkins, J. (2015). A Case of Study of the Petra Nova Carbon Capture Project, 16.
- Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573-1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Kongsjorden, H., Kårstad, O., & Torp, T. A. (1998). Saline Aquifer Storage of Carbon Dioxide in the Sleipner Project. *Waste Management*, 17(5), 303-308. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(97\)10037-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(97)10037-X)
- Korsbakken, J. I., & Aamaas, B. (2016). *Technical Report : Nordic Green to Scale*. (S.I.) : Nordic Council of Ministers. (Google-Books-ID: GsiQDQAAQBAJ). Repéré à [https://books.google.ca/books?id=GsiQDQAAQBAJ&pg=PA57&lpg=PA57&dq=Injection+costs+\\$17+US/Ton+CO2+Sleipner&source=bl&ots=nnM-Ftnf8G&sig=ACfU3U0S8g-0YTP3mXIS-I_Xs4MfN6PkFA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwi-nfits9nkAhWwiOAKHc06C_wQ6AEwCHoECAkQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?id=GsiQDQAAQBAJ&pg=PA57&lpg=PA57&dq=Injection+costs+$17+US/Ton+CO2+Sleipner&source=bl&ots=nnM-Ftnf8G&sig=ACfU3U0S8g-0YTP3mXIS-I_Xs4MfN6PkFA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwi-nfits9nkAhWwiOAKHc06C_wQ6AEwCHoECAkQAQ#v=onepage&q&f=false)
- Koytsoumpa, E. I., Bergins, C., & Kakaras, E. (2018). The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>
- Kumar, M., Sundaram, S., Gnansounou, E., Larroche, C., & Thakur, I. S. (2018). Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: A review. *Bioresource Technology*, 247, 1059-1068. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.050>
- L'Encyclopédie Canadienne. (2019). Changement climatique. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/changement-climatique>
- Lawrence, M. G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oschlies, A., Vaughan, N. E., ... Scheffran, J. (2018). Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
- Li, B., Duan, Y., Luebke, D., & Morreale, B. (2013). Advances in CO₂ capture technology: A patent review. *Applied Energy*, 102, 1439-1447. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.009>

- Li, Q. et Liu, G. (2016). Risk Assessment of the Geological Storage of CO₂: A Review. *Geologic Carbon Sequestration*. Springer International Publishing Switzerland. 247-284. DOI : 10.1007/978-3-319-27019-7_13
- Massachusetts Institute of Technology. (2016a). Petra Nova W.A. Parish Fact Sheet : Carbon Dioxide Capture and Storage Project. Repéré à https://sequestration.mit.edu/tools/projects/wa_parish.html
- Massachusetts Institute of Technology. (2016b). Sleipner Fact Sheet : Carbon Dioxide Capture and Storage Project. Repéré à <https://sequestration.mit.edu/tools/projects/sleipner.html>
- Matter, J. M., Broecker, W. S., Gislason, S. R., Gunnlaugsson, E., Oelkers, E. H., Stute, M., ... Wolff-Boenisch, D. (2011). The CarbFix Pilot Project—Storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia*, 4, 5579-5585. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.546>
- Matter, J. M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Gislason, S. R., Aradóttir, E. S., ... Broecker, W. S. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291), 1312-1314. <https://doi.org/10.1126/science.aad8132>
- McHugh, L. (2018). Petra Nova Demonstrates Technical Potential - but that's just one side of the coin. *World Coal Association*. Repéré à <https://www.worldcoal.org/petra-nova-demonstrates-technical-potential-thats-just-one-side-coin>
- Ministère de la Justice du Canada. (2019). Règlement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone—Secteur de l'électricité thermique au charbon.
- Ministry for the Environment and Natural Resources. (2018). Iceland's Climate Action Plan for 2018-2030.
- Ministry for the Environment and Natural Resources. (s.d.). Climate Change. Repéré à <https://www.government.is/topics/environment-climate-and-nature-protection/climate-change/>
- Ministry of Climate and Environment, M. of C. and. (2019). Norwegian Carbon Credit Procurement Program. *Government.no*. [Redaksjonellartikkel]. Repéré à <https://www.regjeringen.no/en/topics/climate-and-environment/climate/innsiktsartikler-klima/norwegian-carbon-credit-procurement-program/id2415405/>
- Ministry of Petroleum and Energy. (2014). The Government's carbon capture and storage strategy. *Government.no*. [Redaksjonellartikkel]. Repéré à <https://www.regjeringen.no/en/topics/energy/carbon-capture-and-storage/the-governments-carbon-capture-and-storage-strategy/id2353948/>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., ... Dominguez, M. del M. Z. (2018). Negative emissions—Part 1 : Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
- National Energy Technology Laboratory. (2019). Petra Nova Parish Holdings - W.A Parish Post-Combustion CO₂ Capture and Sequestration Project.
- Nations unies. (2015). Accord de Paris. Repéré à https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf
- Natural Resources Defense Council. (2012). What are low-carbon fuels? *Fueling Growth*. Repéré à <http://www.fuelinggrowth.org/why-clean-fuel-matters/what-are-low-carbon-fuels/>
- Norişor, M., Badea, A., & Dincă, C. (2012). Economical and Technical Analysis of CO₂ Transport Ways. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 14(1), 12.

- Office de la coordination environnementale et de l'énergie du canton de Berne (OCEE). (2008). La boussole bernoise du développement durable, 20p.
- Olajire, A. A. (2013). A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109, 364-392. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>
- Olivier, J. G. J. et Peters, J. A. H. W. (2018). *Trends In Global CO₂ And Total Greenhouse Gas Emissions*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Repéré à https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2018-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report_3125.pdf
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2011). *OECD Environmental Outlook to 2050. Chapitre 3 : Climate Change*.
- Pires, J. c. m., Martins, F. g., Alvim-Ferraz, M. c. m., & Simões, M. (2011). Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1446-1460. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.028>
- Pogge von Strandmann, P. A. E., Burton, K. W., Snæbjörnsdóttir, S. O., Sigfússon, B., Aradóttir, E. S., Gunnarsson, I., ... Gislason, S. R. (2019). Rapid CO₂ Mineralisation into Calcite at the CarbFix Storage Site Quantified Using Calcium Isotopes. *Nature Communications*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10003-8>
- Psarras, P., Krutka, H., Fajardy, M., Zhang, Z., Liguori, S., Mac Dowell, N., & Wilcox, J. (2017). Slicing the pie : How big could carbon dioxide removal be? *WIREs Energy and Environment*, 6(5), 21. <https://doi-org.ezproxy.usherbrooke.ca/10.1002/wene.253>
- Rahman, F. A., Aziz, M. M. A., Saidur, R., Bakar, W. A. W. A., Hainin, M. R., Putrajaya, R., & Hassan, N. A. (2017). Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.011>
- Reitze Jr., A. W. (2012). Federal Control of Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Law*, 40(4). Repéré à <http://elawreview.org/articles/volume-40/issue-40-4/federal-control-of-greenhouse-gas-emissions/>
- Ressources naturelles Canada, P. S. and P. C. (2006). FRTCSC – Feuille de route technologique sur la capture et le stockage du dioxyde de carbone du Canada : M154-16/2008F-PDF - Government of Canada Publications - Canada.ca. Repéré à <http://www.publications.gc.ca/site/eng/337372/publication.html>
- Ressources naturelles Canada. (2008). Captage et stockage du carbone. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/charbon/captage-stockage-carbone/4296>
- Ressources naturelles Canada. (2014). Technologie enzymatique de captage efficace du carbone résultant d'activités d'exploitation des sables bitumineux. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/financement-et-partenariats/occasions-de-financement/investissements-actuels/technologie-enzymatique-de-captage-efficace-du-carbone-resultant-dactivites-dexploitation-des-sables?_ga=2.260635397.965046694.1568983983-1797927512.1567775381
- Ressources naturelles Canada. (2018a). Charbon, et captage et stockage du carbone. Repéré à <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/clean-fossil-fuels/coal-co2-capture-storage/4275>

- Ressources naturelles Canada. (2018b). Technologie enzymatique de captage efficace du carbone résultant d'activités d'exploitation des sables bitumineux. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/financement-et-partenariats/occasions-de-financement/investissements-actuels/technologie-enzymatique-de-captage-efficace-du-carbone-resultant-dactivites-dexploitation-des-sables?_ga=2.79278103.2053347964.1567989128-1498684379.1567743383
- Richard, J. (2019). Iceland turns carbon dioxide to rock for cleaner air. Repéré à <https://phys.org/news/2019-05-iceland-carbon-dioxide-cleaner-air.html>
- Richter, A. (2018). CarbFix project in Iceland wins EUR 16m EU Geothermal Emissions Control funding. *Think GeoEnergy—Geothermal Energy News*. Repéré à <http://www.thinkgeoenergy.com/carbfix-project-in-iceland-wins-eur-16m-eu-geothermal-emissions-control-funding/>
- Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., & Schellnhuber, H. J. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), 1269-1271. <https://doi.org/10.1126/science.aah3443>
- Rubin, E. S., Davison, J. E., & Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378-400. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & Maroto-Valer, M. M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chem. Soc. Rev.*, 43(23), 8049-8080. <https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>
- Santibanez-Borda, E., Govindan, R., Elahi, N., Korre, A., & Durucan, S. (2019). Maximising the Dynamic CO₂ storage Capacity through the Optimisation of CO₂ Injection and Brine Production Rates. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 80, 76-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.11.012>
- Santos, S. (s.d.). CO₂ Transport via Pipeline and Ship, 16 p.
- Schlissel, D., & Wamsted, D. (2018). Holy Grail of Carbon Capture Continues to Elude Coal Industry. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. Repéré à http://ieefa.org/wp-content/uploads/2018/11/Holy-Grail-of-Carbon-Capture-Continues-to-Elude-Coal-Industry_November-2018.pdf
- Science Advice for Policy by European Academies. (2018). *Novel carbon capture and utilisation technologies* (Rapport No. 2).
- Senior, B., Chen, W., Gibbins, J., Haydock, H., Li, M., Pearce, J., ... Ulanowsky, D. (2011). Carbon capture and storage in China — main findings from China-UK Near Zero Emissions Coal (NZE) initiative. *Energy Procedia*, 4, 5956-5965. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.598>
- Seo, Y., Huh, C., Lee, S., & Chang, D. (2016). Comparison of CO₂ liquefaction pressures for ship-based carbon capture and storage (CSC) chain. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 52, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.06.011>
- Shimokata, N. (2018). Petra Nova CCUS Project in USA. Repéré à <https://d2oc0ihd6a5bt.cloudfront.net/wp-content/uploads/sites/837/2018/06/Noriaki-Shimokata-Petra-Nova-CCUS-Project-in-USA.pdf>
- Singh, J., & Dhar, D. W. (2019). Overview of Carbon Capture Technology : Microalgal Biorefinery Concept and State-of-the-Art. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00029>

- Singh, P., & Haines, M. (2014). A Review of Existing Carbon Capture and Storage Cluster Projects and Future Opportunities. *Energy Procedia*, 63, 7247-7260.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.761>
- Solomon, S. (2007). Carbon Dioxide Storage : Geological Security and Environmental Issues – Case Study on the Sleipner Gas field in Norway. *Bellona*, 128.
- Styring, P., de Coninck, H., & Armstrong, K. (2011). Carbon Capture and Utilisation in the green economy.
- The Carbon Capture & Storage Association (CSCA). (2019). What is CSC? Repéré à <http://www.CSCassociation.org/what-is-CSC/>
- The Institute for Carbon Removal Law and Policy. (2018). Carbon Removal Fact Sheet—What is BECCS? American University.
- Torp, T. A., & Brown, K. R. (2005). CO2 underground storage costs as experienced at Sleipner and Weyburn. *ResearchGate*. <https://doi.org/DOI: 10.1016/B978-008044704-9/50054-9>
- U.S Senate Committee on Environment and Public Works. (2019). Senators Reintroduce USE IT Act to Promote Carbon Capture Research and Development. *U.S. Senate Committee on Environment and Public Works*. Repéré à <https://www.epw.senate.gov/public/index.cfm/2019/2/senators-reintroduce-use-it-act-to-promote-carbon-capture-research-and-development>
- UK Research and Innovation. (2019). How can CO2 be stored? *British Geological Survey (BGS)*. Repéré à <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/climateChange/CCS/howcanCO2bestored.html>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). The Emissions Gap Report 2017 – A UN Environment Synthesis Report. Nairobi, Kenya. Repéré à https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22070/EGR_2017.pdf
- Utonih, S.-P., & León R., V. V. (s.d.). Economic Assessment of the CarbFix CCS Method. Iceland's School of Energy Internship Program. Repéré à https://www.or.is/sites/or.is/files/03_selma_whelma_economic_assesment_carbfix.pdf
- Wang, F., Dreisinger, D. B., Jarvis, M., & Hitchins, T. (2018). The technology of CO2 sequestration by mineral carbonation : Current status and future prospects. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(1), 46-58. <https://doi.org/10.1080/00084433.2017.1375221>
- Wang, Y., Zhao, L., Otto, A., Robinius, M., & Stolten, D. (2017). A Review of Post-combustion CO2 Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. *Energy Procedia*, 114, 650-665.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>
- Wellenstein, E., & Slagter, M. (2011). Strategies for CCS-chain development. A qualitative comparison of different infrastructure configurations. *Energy Procedia*, 4, 2778-2784.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.181>
- World Coal Association. (2015). Carbon Capture, Use & Storage. *World Coal Association*. Repéré à <https://www.worldcoal.org/reducing-co2-emissions/carbon-capture-use-storage>
- ZeroCO2. (2016). Sleipner West. Repéré à <http://www.zeroco2.no/projects/sleipner-west>